



**Universidade de
Aveiro
2010**

Departamento de Física

**Sara Raquel
de Almeida Rodrigues**

**Movimentos de Navios em Manobra Induzidos pela
Agitação Marítima**



**Sara Raquel
de Almeida Rodrigues**

**Movimentos de Navios em Manobra Induzidos pela
Agitação Marítima**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Meteorologia e Oceanografia Física, realizada sob a orientação científica do Doutor João Alfredo Santos, Investigador Auxiliar do Departamento de Hidráulica do Laboratório Nacional de Engenharia Civil e co-orientação do Doutor Paulo Alves da Silva, Professor Auxiliar do Departamento de Física da Universidade de Aveiro

Este estudo foi desenvolvido no âmbito do projecto MOIA (PTDC/ECM/73145/2006) financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT), realizado no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).

o júri

presidente

Prof. Doutor José Fortes do Nascimento Lopes
Professor auxiliar do Departamento de Física da Universidade de Aveiro

Doutor João Alfredo Santos
Investigador auxiliar do Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas do Departamento de Hidráulica
do Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Prof. Doutor Paulo Alves da Silva
Professor auxiliar do Departamento de Física da Universidade de Aveiro

Doutora Conceição Juana Fortes
Investigadora principal do Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas do Departamento de Hidráulica
do Laboratório Nacional de Engenharia Civil

agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil de Lisboa que ao longo do meu trabalho me acolheu de forma calorosa.

Ao Engenheiro João Alfredo Santos, investigador auxiliar do NPE do DHA (LNEC) que com a sua perseverança e força de trabalho possibilitou a feitura deste e de vários trabalhos meus no LNEC.

Ao Professor Paulo Silva, docente na Universidade de Aveiro, que mostrou prontamente o seu interesse e disponibilidade como orientador.

A todos que de alguma forma contribuíram para a realização desta dissertação.

E por fim, um agradecimento especial aos meus pais e à minha irmã que ao longo de todas as fases da minha vida me têm ajudado e apoiado incondicionalmente.

palavras-chave

Funções de resposta, Movimentos verticais, Navegação, Modelos numéricos, Porto da Praia da Vitória

resumo

O uso de modelos regionais para a propagação da agitação marítima e os modelos numéricos de geração e propagação das ondas permitem o desenvolvimento de uma ferramenta integrada de apoio à decisão da gestão portuária, capaz de emitir avisos ou mensagens de alerta às entidades portuárias competentes sempre que a segurança do porto esteja em causa.

Numa primeira versão desta ferramenta, o utilizador introduz um limiar para a altura da onda no ponto de interesse. No entanto, tal limiar deverá ser definido de acordo com a actividade portuária ou área de interesse para o utilizador. O objectivo deste estudo é apresentar duas metodologias para essa definição, concentrando-se nos aspectos relacionados com os movimentos do navio durante a sua entrada no porto da Praia da Vitória.

Uma vez que não existe um único modelo numérico capaz de simular, de forma computacionalmente eficaz, a propagação da agitação marítima sobre áreas grandes tendo em conta todos os fenómenos relevantes, é necessário recorrer ao acoplamento de três modelos numéricos diferentes para se estudar a propagação das ondas desde o largo até ao interior do porto.

O número de vezes que o movimento vertical de um ponto no navio “N/M Fernão Gomes” excede a altura de um limiar de 0.5m, foi determinado utilizando a função de transferência da resposta, determinada com um modelo numérico para a interacção de um corpo flutuante com ondas, bem como uma outra metodologia designada por de matriz de possibilidade, que é descrita neste estudo. O teste mostrou que esta metodologia produz resultados semelhantes aos da função de transferência da resposta na avaliação da inoperacionalidade do navio.

keywords

Response function, vertical motions, Navigation, Numerical models, Praia da Vitória port

abstract

The use of regional models for sea wave propagation and of numerical models for wave propagation enabled the development of an integrated decision support tool for port management that is able to issue warning or alert messages to the relevant members of the port community whenever port safety is at stake.

In the preliminary version of this tool the user introduces the wave height threshold for the point of interest. However, such threshold is to be defined according to the port activity or area of interest of the user. The objective of this study is to present two approaches for this definition, focusing on aspects related to ship motions during her journey inside the port of Praia da Vitória.

Since there is not one single model capable of simulating in a computationally efficient way sea wave propagation over large areas and taking into account all the relevant phenomena it was necessary to couple three different numerical models to study wave propagation from offshore into the port.

The number of times vertical motions of one point in the “N/M Fernão Gomes” ship exceeded the threshold height of 0.5 m was determined using the response transfer function, determined with a numerical model for the interaction of floating bodies and waves, as well as the so-called possibility matrix approach described in this study. The test showed that this approach produces results similar to those of the response transfer function in the downtime evaluation the ship.

ÍNDICE

1	Introdução.....	1
2	Resposta de sistemas lineares.....	4
2.1	Método de resposta a impulso	4
2.2	Método de resposta em frequência	5
2.3	Resposta do navio a um estado de agitação.....	6
2.3.1	Densidade espectral de energia.....	7
2.3.2	Espectros empíricos para a agitação marítima	9
2.3.3	Determinação do espectro da resposta.....	11
2.3.4	Frequência de encontro.....	11
2.3.5	Distribuição de Rayleigh	13
3	Movimentos do navio.....	15
3.1	Potencial do escoamento associado à resposta em frequência	15
3.2	Modelo numérico WAMIT.....	20
3.3	Exemplo de aplicação	22
4	Aplicação ao porto da Praia da Vitória	26
4.1	Regime da agitação marítima na entrada e no interior do porto.....	27
4.1.1	Modelos numéricos	28
4.1.1.1	Modelo SWAN	28
4.1.1.2	Modelo DREAMS	29
4.1.2	Matrizes de transferência.....	30
4.1.3	Condições de aplicação dos modelos SWAN e DREAMS	30
4.1.4	Resultados numéricos	34
4.2	Resposta do “N/M Fernão Gomes” à agitação incidente	38
4.2.1	Espectro da resposta do navio	39

4.2.2	Avaliação dos efeitos da agitação marítima no navio em manobra	40
4.2.2.1	Resposta em frequência	41
4.2.2.2	Matriz de possibilidade.....	42
4.2.2.3	Inoperacionalidade devido a movimentos excessivos	44
5	Conclusões	46
6	Referências	49

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Esquema da resposta a um sistema linear.....	4
Figura 2 -	Comparação entre o espectro PM e de JONSWAP, (Chakrabarti 1987).....	11
Figura 3 -	Convenção para o ângulo de rumo relativamente às ondas.....	12
Figura 4 -	Coordenadas generalizadas do movimento do navio.....	16
Figura 5 -	Decomposição do problema da interacção de um corpo flutuante.....	16
Figura 6 -	Esquema da painelização da superfície molhada do casco do navio “N/M Fernão Gomes”.....	22
Figura 7 -	Influência da profundidade nos coeficientes de massa adicionada e de amortecimento para o modo de arfagem do “N/M Fernão Gomes”.....	23
Figura 8 -	Influência da profundidade na força vertical no “N/M Fernão Gomes” provocada por ondas incidentes cujo vector número de onda faz um ângulo de 45° com o eixo longitudinal do navio.	23
Figura 9 -	Influência na amplitude do movimento vertical do ponto (45.5, 5.4, 0.0) do “N/M Fernão Gomes” do ângulo entre o eixo longitudinal do navio e o vector número de onda da onda incidente no navio quando ele está colocado sobre uma zona com 37.9 m de profundidade.....	24
Figura 10 -	Influência na amplitude do movimento vertical do ponto (45.5, 5.4, 0.0) do “N/M Fernão Gomes” da profundidade da zona onde o navio está para um ângulo de 30° entre o eixo longitudinal do navio e o vector número de onda da onda incidente no navio.....	25
Figura 11 -	Porto da Praia da Vitória.....	26
Figura 12 -	Metodologia para a transferência do regime de agitação marítima do largo para o interior do porto.....	28
Figura 13 -	Modelo SWAN, malhas computacionais.	31
Figura 14 -	Modelo DREAMS, batimetria com a localização dos pontos P1 a P4 na entrada e no interior do porto.....	33
Figura 15 -	Comparação dos resultados da altura significativa obtidos com o SWAN e com as medições da bóia.	35
Figura 16 -	Série temporal dos valores da a) altura significativa (H_s) e b) direcção média (DIR) para os pontos localizados no interior do porto, para um período de 1 de Janeiro a 28 de Fevereiro de 2009.....	36
Figura 17 -	a) Espectro da agitação incidente, $S(\omega)$; b) Espectro da resposta à agitação incidente no navio, $S_R(\omega)$. Para $H_s=0.4$ m, $T_p=12$ s e $Dir=30^\circ$	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Características das malhas utilizadas na simulação com o SWAN.	31
Tabela 2 -	Parâmetros estatísticos da agitação marítima ao largo e nos pontos P1 a P4.	37
Tabela 3 -	Profundidades e rumos do navio nos centróides de cada um dos troços em que foi dividido o percurso de entrada no porto.	38
Tabela 4 -	Matriz multidimensional da função de resposta com a altura do movimento vertical para ondas incidentes regulares. “N/M Fernão Gomes” numa zona com 37.9 m de profundidade, dirigindo-se para Oeste com ondas de Nordeste.	42
Tabela 5 -	Matriz multidimensional da função de resposta com a altura significativa do movimento vertical para agitação incidente irregular. “N/M Fernão Gomes” numa zona com 37.9 m de profundidade, dirigindo-se para Oeste com ondas de Nordeste.	42
Tabela 6 -	Matriz multidimensional da ondulação incidente para a qual a altura do movimento vertical excede um limiar de 0.5 m. “N/M Fernão Gomes” numa zona com 37.9 m de profundidade, dirigindo-se para Oeste com ondas de Nordeste.	43
Tabela 7 -	Matriz multidimensional da agitação incidente irregular para a qual a altura significativa do movimento vertical excede um limiar de 0.5 m. “N/M Fernão Gomes” numa zona com 37.9 m de profundidade, dirigindo-se para Oeste com ondas de Nordeste.	43
Tabela 8 -	Espaçamento de parâmetros que levou à menor diferença entre os resultados do procedimento do ponto mais próximo e a função de resposta do navio. Para um limiar de 0.5 m no movimento vertical do ponto (45.5, 5.4, 0.0) do “N/M Fernão Gomes” na trajectória de entrada no porto.	45
Tabela 9 -	Espaçamento de parâmetros que levou à menor diferença entre os resultados do procedimento da média dos pontos vizinhos e a função de resposta do navio. Para um limiar de 0.5 m no movimento vertical do ponto (45.5, 5.4, 0.0) do “N/M Fernão Gomes” na trajectória de entrada no porto.	45

SIMBOLOGIA

a_{kj}	- coeficiente de massa adicionada segundo a coordenada generalizada k para a oscilação do corpo, de amplitude unitária, segundo a coordenada generalizada j
b_{kj}	- coeficiente de amortecimento segundo a coordenada generalizada k para a oscilação do corpo, de amplitude unitária, segundo a coordenada generalizada j
c	- velocidade de fase da onda
C_{kj}	- elemento da matriz de restituição hidrostática
DIR	- direcção média do período de pico
DIS	- dispersão direcciona
E	- densidade de energia por unidade de área
F_k^D	- força de difracção segundo a coordenada generalizada k
F_k^E	- força de excitação segundo a coordenada generalizada k
F_k^R	- força de radiação segundo a coordenada generalizada k
$h(t)$	- resposta do sistema
H	- altura
H_s	- altura significativa
H_{rms}	- raiz quadrada média da altura da onda
$H(\omega)$	- função de resposta em frequência
m_n	- momento espectral de ordem n
m_0	- momento espectral de ordem zero
M_{kj}	- elemento da matriz de massa do navio
n_k	- componente do vector normal segundo a coordenada generalizada k
p	- pressão
$p(H)$	- função de densidade de probabilidade da altura de onda
$P(H' < H)$	- distribuição de probabilidade de Rayleigh
$S(\omega)$	- espectro de densidade de energia
$S_R(\omega)$	- espectro da resposta
t	- variável tempo

$T_{0,1}$	- período médio definido com os momentos espectrais m_0 e m_1
$T_{kj}(\omega)$	- matriz de transferência
T_P	- período de pico
T_R	- registo de duração do tempo
T_Z	- período médio de zero ascendente
U	- velocidade de avanço do navio
$x(t)$	- sinal de entrada
$X_0(\omega)$	- amplitude complexa da excitação
$y(t)$	- sinal de saída
$Y_0(\omega)$	- amplitude complexa da resposta
β	- ângulo entre o vector de velocidade do navio e o vector de velocidade de propagação das ondas
γ	- parâmetro de elevação do pico
η	- elevação da superfície livre
θ_j	- fase do movimento
k	- número de onda
λ	- comprimento de onda
v_r	- velocidade relativa de encontro
ξ_j	- amplitude da oscilação segundo a coordenada generalizada j
$\dot{\xi}_j$	- velocidade do movimento segundo a coordenada generalizada j
$\ddot{\xi}_j$	- aceleração do movimento segundo a coordenada generalizada j
ξ_j^a	- amplitude real do movimento oscilatório segundo a coordenada generalizada j
ξ_j^A	- amplitude complexa do movimento oscilatório segundo a coordenada generalizada j
σ	- coeficiente da assimetria do espectro
φ_D	- potencial de difracção
φ_j	- potencial complexo estacionário
ϕ	- potencial do escoamento
ϕ_γ	- potencial da onda difractada pelo navio

ϕ_0	- potencial da onda incidente
ω	- frequência angular ou frequência absoluta
ω_e	- frequência de encontro
ω_p	- frequência de pico

1 Introdução

As operações portuárias podem ser fortemente condicionadas pela agitação marítima. Com efeito, a agitação marítima pode levar a movimentos excessivos de navios amarrados nos terminais o que pode causar interrupções naquelas operações ou mesmo estragos nos navios, nas infra-estruturas portuárias, nos navios vizinhos e até no ambiente portuário. Se um navio está a navegar na entrada ou no interior do porto, a agitação marítima pode originar movimentos verticais do navio de grande amplitude causando o encalhe ou mesmo naufrágio do navio, dependendo da capacidade do fundo para danificar seriamente o casco daquele.

Dos exemplos anteriores pode concluir-se que as actividades de gestão de qualquer autoridade portuária associadas beneficiarão certamente com o desenvolvimento da capacidade de previsão da agitação marítima e dos seus efeitos nas operações portuárias.

Os modelos numéricos regionais de previsão da agitação marítima são capazes de produzir estimativas muito exactas das características da agitação marítima gerada pelo vento ao largo de qualquer porto. Depois, utilizando modelos numéricos para propagação de ondas, transferem-se aquelas características desde o largo até qualquer ponto no interior de uma bacia portuária.

No âmbito do projecto MOIA (Santos et al., 2009) encontra-se acoplado um conjunto destes modelos tendo em vista o objectivo de contribuir para o desenvolvimento de uma ferramenta integrada para apoio à tomada de decisão na gestão portuária que prevê os efeitos da agitação marítima nas infra-estruturas, na navegação e nas operações portuárias, emitindo mensagens de aviso ou de alerta para os membros relevantes da comunidade portuária sempre que a segurança do porto esteja em causa.

O acoplamento deste conjunto de modelos numéricos tem sido testado na área marítima adjacente ao porto da Praia da Vitória, na ilha Terceira do arquipélago dos Açores. A escolha deste local deve-se à instalação, no âmbito do projecto CLIMAAT, (Azevedo et al., 2008), de uma bóia direcciona localizada a pouco mais de 4 km a Nordeste do porto, numa zona com 90 m de profundidade (38°45'00"N 27°00'85"W). Devido à proximidade ao porto de instrumentos de medição capazes de caracterizar a agitação marítima, o porto da Praia da Vitória tornou-se num local interessante para verificar o desempenho dos modelos numéricos para a propagação da agitação marítima.

Com base também na modelação numérica da interacção de corpos flutuantes com ondas, é possível desenvolver um procedimento de avaliação dos movimentos induzidos pela agitação marítima num navio em manobra na entrada de um porto.

Os modelos numéricos desenvolvidos para determinar os esforços e os movimentos de estruturas flutuantes destinadas à exploração petrolífera em mar alto podem ser utilizados na resolução do problema da interacção de um corpo flutuante com as ondas. O modelo numérico WAMIT, Newman e Sclavounos (1988), desenvolvido pelo Departamento de Engenharia Oceânica do Massachusetts Institute of Technology, é um desses modelos. Este modelo numérico é utilizado para determinar os potenciais dos problemas de radiação e de difracção do navio livre, especialmente quando o navio está colocado em zonas de profundidade muito limitada, como é o esperado na entrada de bacias portuárias.

Rusu (2009) apresenta uma abordagem para a avaliação dos efeitos da agitação marítima nos movimentos verticais de navios em manobras de entrada e de saída de portos, utilizando um modelo numérico baseado no método das faixas para determinar a resposta em frequência de um navio que entra no estuário do Tejo. No entanto, no trabalho desenvolvido por Rusu não foi estabelecido um procedimento para ter em conta a influência da resposta do navio na variação da profundidade da zona onde o navio se desloca.

O objectivo deste trabalho consiste em desenvolver uma metodologia para determinar a resposta de um navio à agitação marítima incidente ao longo da sua trajectória de entrada num porto, avaliando a possibilidade de um dado estado de agitação induzir movimentos excessivos do navio em manobra.

Em maior detalhe, o trabalho desenvolvido consiste em (i) caracterizar a agitação marítima na zona de entrada de um porto, utilizando os resultados de modelos numéricos para a previsão da agitação marítima gerada pelo vento (modelo WAVEWATCH III, Tolman (1999)) e depois utilizando modelos numéricos para a propagação de ondas transferem-se aquelas características para o interior do porto (modelo SWAN, Booij et al. (1996, 1999) e DREAMS, Fortes (1993, 2002)); (ii) determinar a função de resposta do navio em termos da amplitude dos movimentos verticais de um ponto seleccionado no navio; (iii) avaliar a influência da profundidade na amplitude do movimento vertical de um ponto no navio; (iv) avaliar os efeitos da agitação marítima num navio em manobra na

trajectória de entrada no porto, caracterizando as alturas dos movimentos do navio induzidos pela agitação por uma distribuição de Rayleigh.

Tendo em conta os objectivos, este trabalho encontra-se dividido em 5 capítulos. Depois deste capítulo de introdução, descreve-se no capítulo 2 as equações de resposta a sistemas lineares no domínio do tempo e da frequência, bem como a resposta do navio a um estado de agitação. No capítulo 3 descreve-se os movimentos do navio, as equações que regem os potenciais associados aos problemas de radiação e de difracção, e apresenta-se um exemplo de aplicação do modelo numérico WAMIT no estudo da resposta de um navio em termos da amplitude dos movimentos verticais. O capítulo 4 diz respeito à aplicação ao porto da Praia da Vitória, onde se apresenta uma metodologia para determinar as características da agitação marítima na entrada e no interior do porto com a implementação do modelo SWAN e DREAMS por forma a avaliar a influência dos efeitos da agitação marítima num navio em quatro pontos ao longo da trajetória de entrada de um navio no porto. Finalmente, no capítulo 5, indicam-se as principais conclusões do trabalho e apontam-se as direcções a seguir num trabalho futuro.

2 Resposta de sistemas lineares

Um sistema é definido como uma relação funcional entre o sinal de entrada $x(t)$ e o sinal de saída $y(t)$, tal que:

$$y(t) = f[x(t)] \quad ; \quad -\infty < t < \infty$$

O sistema é considerado linear se ao ser excitado na entrada com um sinal sinusoidal apresentar uma resposta estacionária sinusoidal com a mesma frequência. Na Figura 1 encontra-se representado um esquema da resposta a um sistema linear, as setas indicam a origem das funções da transformada de Fourier e da inversa da transformada de Fourier.

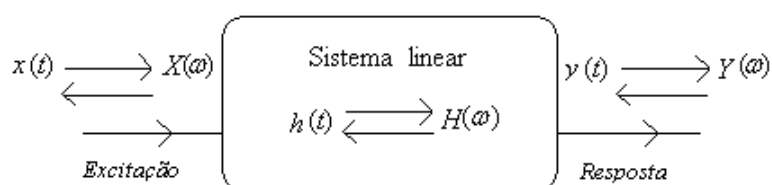


Figura 1 - Esquema da resposta a um sistema linear.

A caracterização da resposta de um sistema linear pode ser realizada no domínio do tempo ou no domínio da frequência.

No primeiro caso, o objectivo é determinar a resposta do sistema a uma excitação de carácter impulsivo (a chamada função de resposta a impulso). A convolução desta função de resposta a impulso com o sinal da entrada fornece a resposta do sistema a esse sinal.

No segundo caso, determinam-se a amplitude e a diferença de fase da resposta estacionária do sistema a uma excitação sinusoidal. Isto é, algum tempo depois de iniciada a excitação sinusoidal o sistema apresenta uma resposta que é também sinusoidal (com o mesmo período da excitação) e com uma amplitude que será um múltiplo da amplitude do sinal de entrada.

Neste capítulo começa-se por estudar a resposta de um sistema linear no domínio do tempo e depois no domínio da frequência.

2.1 Método de resposta a impulso

Uma forma de definir as características dinâmicas de um sistema é medir, ao longo do tempo e até que o equilíbrio estacionário seja recuperado, a resposta $h(t)$ do sistema a uma solicitação do tipo impulso.

A resposta do sistema num instante t depois do instante t_0 em que começou a ser aplicada uma excitação qualquer $x(t)$, é obtida através da convolução de $x(t)$ com $h(t)$.

$$y(t) = \int_{t_0}^t h(t - \tau)x(\tau)d\tau \quad (2.1)$$

Esta equação traduz a aplicação do princípio da sobreposição válido para sistemas lineares.

2.2 Método de resposta em frequência

Neste método pretende-se avaliar as características da resposta estacionária do sistema quando excitado por uma entrada sinusoidal, nomeadamente a amplitude e a diferença de fase em relação à excitação. Assim a função de resposta em frequência fornece a relação entre a amplitude da resposta e a amplitude de excitação bem como a diferença de fase para qualquer frequência com que o sistema seja excitado.

Se o sinal de entrada do sistema for uma sinusóide $x(t) = x_0 \cos(\omega t)$, a resposta estacionária do sistema a esta excitação poderá determinar-se utilizando o integral de convolução para obter os valores da resposta muito tempo depois de iniciada a excitação.

Tratando-se de um sistema causal, a função resposta a impulso é nula quando o argumento é menor que zero, isto é, antes da aplicação de uma excitação impulsiva a resposta do sistema é nula. Tal implica que não faz diferença limitar o intervalo de integração a t , podendo por isso ir até $+\infty$. Por outro lado, se aquilo que se procura é a resposta em regime estacionário, o instante t_0 em que começou a ser aplicada a excitação já ocorreu há muito tempo (vai-se considerar $-\infty$). Então o integral de convolução acima pode se escrever como

$$y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t - \tau)x(\tau)d\tau \quad (2.2)$$

Introduzindo a mudança de coordenadas $\gamma = t - \tau$ fica

$$y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(\gamma)x(t - \gamma)d\gamma \quad (2.3)$$

Considerando agora

$$x(t) = x_0 \cos(\omega t) = \text{Re}[X_0(\omega)e^{i\omega t}] \quad (2.4)$$

em que $X_0(\omega)$ é a amplitude complexa da excitação de frequência ω , a resposta em regime estacionário pode obter-se como

$$y(t) = \text{Re} \left[\int_{-\infty}^{\infty} h(\gamma) X_0(\omega) e^{i\omega(t-\gamma)} d\gamma \right] = \text{Re} \left[X_0(\omega) e^{i\omega t} \int_{-\infty}^{\infty} h(\gamma) e^{-i\omega\gamma} d\gamma \right] \quad (2.5)$$

$$y(t) = \text{Re} [X_0(\omega) e^{i\omega t} H(\omega)] \quad (2.6)$$

Note-se que $H(\omega)$ designa a transformada de Fourier de $h(t)$

$$H(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) e^{-i\omega t} dt \quad (2.7)$$

Por definição, a função de resposta em frequência, $Z(\omega)$, obtêm-se do quociente entre a amplitude complexa $Y_0(\omega)$ da resposta estacionária do sistema

$$y(t) = \text{Re} [Y_0(\omega) e^{i\omega t + \theta}] \quad (2.8)$$

e a amplitude complexa $X_0(\omega)$ da excitação sinusoidal

$$x(t) = \text{Re} [X_0(\omega) e^{i\omega t}] \quad (2.9)$$

Atendendo à equação (2.6) e à definição anterior, pode então concluir-se que a transformada de Fourier da função resposta a impulso é igual à função de resposta em frequência

$$Z(\omega) = \frac{Y_0(\omega)}{X_0(\omega)} = H(\omega) \quad (2.10)$$

2.3 Resposta do navio a um estado de agitação

A interacção do sistema corpo flutuante com as ondas nele incidente pode ser considerada linear (Cummins, 1962). Assim a determinação da amplitude do movimento vertical em qualquer ponto seleccionado no casco do navio pode ser realizada utilizando os resultados no domínio da frequência.

Uma forma de representar o sinal da excitação actuante no navio é a densidade espectral de energia que descreve a distribuição da energia de um sinal pelas várias frequências que o compõem. Para a agitação marítima considerou-se o espectro empírico JONSWAP.

O espectro da resposta do navio à agitação incidente pode ser determinado a partir do espectro da agitação incidente no navio e da função de resposta em frequência (em termos da amplitude da oscilação de um ponto seleccionado no navio).

Se o navio tem uma velocidade de avanço não nula, no cálculo do espectro da resposta a frequência da onda incidente no navio deve ser substituída pela frequência de encontro, isto é, a frequência com que o navio encontra as ondas.

Admitindo que ambos os espectros da agitação incidente e o da resposta do navio são de banda estreita, então as alturas das ondas nas séries temporais do estado de agitação incidente e do movimento vertical do navio seguem uma distribuição de Rayleigh.

2.3.1 Densidade espectral de energia

A forma simples de representar uma onda do oceano é através de uma oscilação sinusoidal da superfície livre, η , com frequência ω .

$$\eta(t) = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) \quad (2.11)$$

em que $H/2$ é a amplitude, $\omega = 2\pi/T$ é a frequência da onda, t é o tempo, x o ponto do espaço na direcção de propagação da onda e $k = 2\pi/\lambda$ é o número de onda, sendo λ o comprimento de onda (a distância entre duas cristas ou duas cavas consecutivas).

Considerando $x=0$ e generalizando a forma da onda de modo a ser representada como uma série de Fourier contendo componentes de múltiplos da frequência fundamental ω , tem-se:

$$\eta(t) = \sum_{n=1}^N A_n \cos(n\omega t + \varepsilon_n) \quad (2.12)$$

$$\eta(t) = \sum_{n=1}^N (a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)) \quad (2.13)$$

onde N é o número de componentes de Fourier.

Os coeficientes a_n e b_n são os coeficientes de Fourier dados por:

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T \eta(t) \cos(n\omega t) dt \quad (2.14)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T \eta(t) \sin(n\omega t) dt \quad (2.15)$$

A energia total da onda (por unidade de área de superfície) é dada por:

$$E = \frac{1}{2} \rho g \int_{-\infty}^{\infty} [\eta(t)]^2 dt \quad (2.16)$$

em que ρ é a densidade do fluido e g a aceleração da gravidade.

Generalizando a expressão $\eta(t)$ da equação (2.13) para que as frequências não sejam mais representados por componentes de Fourier, tem-se:

$$\eta(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} [a(\omega) \cos(\omega t) + b(\omega) \sin(\omega t)] d\omega \quad (2.17)$$

onde $a(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \eta(t) \cos(\omega t) dt$ e $b(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \eta(t) \sin(\omega t) dt$. Então a equação (2.16) pode ser escrita como:

$$E = \frac{1}{2\pi} \rho g \int_{-\infty}^{\infty} \eta(t) \left[\int_{-\infty}^{\infty} [a(\omega) \cos(\omega t) + b(\omega) \sin(\omega t)] d\omega \right] dt \quad (2.18)$$

$$E = \frac{1}{2\pi} \rho g \int_{-\infty}^{\infty} \left[a(\omega) \int_{-\infty}^{\infty} \eta(t) \cos(\omega t) dt + b(\omega) \int_{-\infty}^{\infty} \eta(t) \sin(\omega t) dt \right] d\omega \quad (2.19)$$

$$E = \frac{1}{2\pi} \rho g \int_{-\infty}^{\infty} [a^2(\omega) + b^2(\omega)] d\omega \quad (2.20)$$

$$E = \frac{1}{2\pi} \rho g \int_{-\infty}^{\infty} A^2(\omega) d\omega \quad (2.21)$$

Na equação (2.21) $A^2(\omega) = a^2(\omega) + b^2(\omega)$, é uma função contínua da frequência.

Igualando as equações (2.16) e (2.21), obtêm-se a igualdade do Teorema de Parseval:

$$\int_{-\infty}^{\infty} [\eta(t)]^2 dt = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} [A(\omega)]^2 d\omega \quad (2.22)$$

que suporta a definição do conceito de espectro de energia.

Com efeito, calculando $\overline{[\eta(t)]^2}$ o valor médio quadrático de elevação da superfície livre num registo de duração T_R , tem-se

$$\overline{[\eta(t)]^2} = \frac{1}{T_R} \int_0^T [\eta(t)]^2 dt = \frac{1}{\pi T_R} \int_{-\infty}^{+\infty} [A(\omega)]^2 d\omega \quad (2.23)$$

A partir desta expressão pode-se obter a densidade de energia por unidade de área do registo de duração T_R

$$\bar{E} = \frac{1}{2} \rho g \int_{-\infty}^{\infty} \frac{A^2(\omega)}{\pi T_R} d\omega \quad (2.24)$$

Definindo a densidade espectral de energia por:

$$S(\omega) = \frac{A^2(\omega)}{\pi T_R} \quad (2.25)$$

a densidade de energia por unidade de área no registo de duração T_R é obtida da área sob a curva de densidade espectral de energia como uma função de frequência.

$$E = \frac{1}{2} \rho g \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) d\omega \quad (2.26)$$

A densidade espectral de energia descreve a distribuição da energia (ou variação) de um sinal ao longo da frequência. Se $x(t)$ é um sinal de energia finita, o espectro de densidade de energia do sinal $S(\omega)$ é o quadrado da módulo da transformada de Fourier do sinal.

$$S(\omega) = \frac{1}{\pi T_R} \left| \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-i\omega t} dt \right|^2 = \frac{1}{\pi T_R} X(\omega) X^*(\omega) \quad (2.27)$$

Onde ω é a frequência angular, $X(\omega)$ a transformada de Fourier de $x(t)$ e $X^*(\omega)$ é o seu conjugado complexo.

2.3.2 Espectros empíricos para a agitação marítima

A forma do espectro de ondas varia consideravelmente de acordo com a velocidade do vento, período de tempo que o vento sopra (duração), comprimento do fetch, etc. Existem na literatura vários espectros que foram propostos ao longo do tempo por diversos autores e que se baseiam em análises teóricas juntamente com ajustes empíricos. Os modelos de espectros são geralmente baseados em um ou mais parâmetros, tais como a altura de onda, período de onda e os factores de forma que variam de acordo com a velocidade do vento e o comprimento do fetch.

Dos vários espectros existentes, destacam-se dois que são os mais utilizados para caracterizar estados do mar o espectro de Pierson-Moskowitz (P-M) e o de JONSWAP. O

espectro de Pierson-Moskowitz (1964) é mais simples e é em função de apenas dois parâmetros, enquanto o de JONSWAP (Hasselmann et al., 1973) já possui cinco parâmetros.

Para estados de agitação totalmente desenvolvidos no oceano, Pierson e Moskowitz (1964) propuseram uma formulação para o espectro de potência (espectro PM), que é função apenas da velocidade do vento:

$$S(\omega) = \alpha g^2 (2\pi)^{-4} \omega^{-5} \exp \left[-\frac{5}{4} \left(\frac{\omega}{\omega_p} \right)^{-4} \right] \quad (2.28)$$

onde $\alpha = 8.10 \times 10^{-3}$ e $\omega_p = (2\pi)^{-1} \left(4\beta/5 \right)^{\frac{1}{4}} g U_{19.5}^{-1}$, sendo $\beta = 0.74$ e $U_{19.5}$ a velocidade do vento a 19.5m de altura.

O espectro de JONSWAP foi desenvolvido com base de um estudo de um extensivo conjunto de dados de ondas do programa Joint North Sea Wave Project, realizado entre 1968 e 1969 (Hasselmann et al., 1973), com o objectivo de compreender o processo de formação das ondas geradas pelo vento. Os resultados desse estudo foram utilizados para estabelecer fórmulas de previsão da altura significativa e do período de onda, considerando uma velocidade de vento constante e incluem limitações no comprimento do fetch. Este espectro é obtido a partir de uma modificação do espectro de P-M, e representa estados do mar em desenvolvimento em que a geração de ondas se processa em zonas limitadas pelo comprimento do fetch. A função de densidade energia deste espectro é dada por:

$$S(\omega) = \alpha g^2 (2\pi)^{-4} \omega^{-5} \exp \left[-\frac{5}{4} \left(\frac{\omega}{\omega_p} \right)^{-4} \right] \gamma^{\exp \left[\frac{-(\omega - \omega_p)^2}{2\sigma^2 \omega_p^2} \right]} \quad (2.29)$$

onde $\gamma = 3.3$ e $\sigma = \begin{cases} \sigma_a = 0.07 & \text{para } \omega \leq \omega_p \\ \sigma_b = 0.09 & \text{para } \omega > \omega_p \end{cases}$

ω_p é a frequência de pico, σ é o coeficiente que traduz a assimetria do espectro e γ é o parâmetro de pico, que representa a razão entre a energia espectral máxima e a energia correspondente do espectro de Pierson-Moskowitz. A Figura 2 mostra que o espectro de JONSWAP é semelhante ao de P-M, sendo o pico do espectro mais elevado.

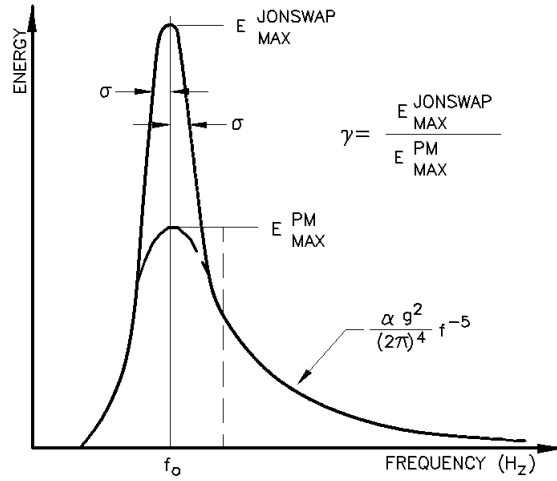


Figura 2 - Comparação entre o espectro PM e de JONSWAP, (Chakrabarti 1987).
Adaptado de Vincent et al. (2006).

2.3.3 Determinação do espectro da resposta

Se aplicarmos a um sistema linear uma entrada representada por um espectro de densidade de energia, $S(\omega)$, então a saída correspondente será um espectro da resposta da densidade espectral da energia, $S_R(\omega)$. De forma análoga à equação (2.27), o espectro de densidade da resposta é dado por:

$$S_R(\omega) = \frac{1}{\pi T_R} \left| \int_{-\infty}^{\infty} y(t) e^{-i\omega t} dt \right|^2 = \frac{1}{\pi T_R} Y(\omega) Y^*(\omega) \quad (2.30)$$

É um facto bem conhecido que a transformada de Fourier de um integral de convolução é igual ao produto das transformadas de Fourier das funções envolvidas, isto é,

$$y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau) x(t - \tau) d\tau \Rightarrow Y(\omega) = H(\omega) X(\omega) \quad (2.31)$$

Desta forma, a equação (2.30) pode escrever-se

$$S_R(\omega) = \frac{1}{\pi T_R} H(\omega) X(\omega) H^*(\omega) X^*(\omega) = |H(\omega)|^2 S(\omega) \quad (2.32)$$

2.3.4 Frequência de encontro

Ao estudar o comportamento dos navios no mar, é importante considerar a frequência com que o navio encontra ondas, ω_e . A frequência de encontro depende da velocidade das ondas, da velocidade do navio e da posição das ondas em relação ao navio.

O ângulo entre o vector de velocidade do navio e o vector de velocidade de propagação das ondas é denotado por β . A convenção usada para o ângulo é de zero graus para ondas de proa, Figura 3, isto é, para $\beta = 0^\circ$ o navio e as ondas estão viajando na mesma direcção.

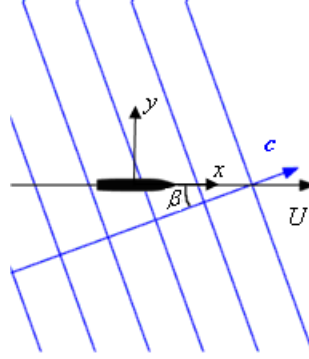


Figura 3 - Convenção para o ângulo de rumo relativamente às ondas.

A frequência de encontro pode ser calculada considerando a componente de velocidade de avanço do navio, U , na direcção das ondas e subtraindo a velocidade da fase da onda, c . A velocidade relativa de encontro, v_r , dada pela seguinte expressão:

$$v_r = c - U \cos \beta \quad (2.33)$$

Então o período de encontro é dado por:

$$T_e = \frac{\lambda}{c - U \cos \beta} \quad (2.34)$$

Como a frequência angular é dada por $\omega = \frac{2\pi}{T}$, então a frequência de encontro é:

$$\omega_e = \frac{2\pi}{\lambda} (c - U \cos \beta) \quad (2.35)$$

Assumindo que o navio se encontra em águas profundas, é utilizada a relação para a velocidade de fase da onda em águas profundas. Portanto, simplificando a frequência de encontro, tem-se:

$$\omega_e = \omega - \frac{\omega^2 U}{g} \cos \beta \quad (2.36)$$

em que ω é a frequência da onda incidente.

2.3.5 Distribuição de Rayleigh

Um processo estocástico de banda estreita tem a função de densidade espectral concentrada na vizinhança de uma certa frequência. Com base nesta hipótese e na de processo estocástico Gaussiano, pode-se chegar analiticamente à função de densidade de probabilidade de Rayleigh, que foi desenvolvida originalmente por Lord Rayleigh em 1880 e introduzida por Longuet-Higgins (1952) na estimativa das alturas das ondas individuais na serie temporal de um estado de agitação ou dos movimentos verticais de um ponto do navio em resposta a esse estado de agitação.

As ondas individuais podem ser definidas pelo método de zero ascendente (ou zero descendente), que consiste em identificar uma onda entre duas passagens consecutivas da elevação da superfície livre pelo nível médio (nível zero) no sentido ascendente (ou descendente). A distância entre os dois pontos adjacentes de zero ascendente define o período da onda no caso do eixo das abcissas ser o tempo, ou o comprimento de onda no caso do eixo das abcissas ser a distância horizontal (Goda, 1985).

Existem várias características espectrais que podem estar directamente relacionados com a série temporal representada. O cálculo dessas características está relacionado com o momento espectral de ordem n , m_n . O momento de ordem n da densidade de energia é calculado usando a equação abaixo, onde n é um número inteiro positivo ($n = 0, 1, 2, \dots$).

$$m_n = \int_0^{\infty} \omega^n S(\omega) d\omega \quad (2.37)$$

Em particular, o momento de ordem zero, m_0 , representa a área sob a curva do espectro de onda (da densidade espectral). A partir do valor de m_0 pode-se obter a altura significativa H_s para um registo cuja distribuição de alturas de ondas segue a distribuição de Rayleigh, através da seguinte equação:

$$H_s = 1.42\sqrt{8m_0} = 4.02\sqrt{m_0} \approx 4\sqrt{m_0} \quad (2.38)$$

A altura significativa corresponde à média do terço das alturas mais elevadas. A raiz quadrada média da altura da onda, H_{rms} , cujo quadrado é uma boa medição da média da energia das ondas, está relacionada com a altura significativa $H_{rms} = H_s / \sqrt{2}$.

A frequência média é obtida através do espectro pela razão entre o momento de ordem 1 e o de ordem zero. O período médio, correspondente à frequência média do

espectro e o período médio de cruzamento de zero ascendente, T_z , podem ser calculados através do espectro de energia em termos de momentos espectrais dados por:

$$T_{0,1} = \frac{m_0}{m_1} \quad (2.39)$$

$$T_z = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \quad (2.40)$$

De acordo com a teoria estatística, a probabilidade de se encontrar uma onda maior que uma determinada altura H é dada por:

$$P(H' \geq H) = e^{-\left(\frac{H}{H_{rms}}\right)^2} \quad (2.41)$$

que é chamada de distribuição de Rayleigh.

A função de densidade de probabilidade da altura de onda, $p(H)$, é dada através da distribuição de probabilidade de Rayleigh $P(H' < H)$:

$$p(H) = \frac{d}{dH} (P(H' < H)) = \frac{d}{dH} \left(1 - e^{-\left(\frac{H}{H_{rms}}\right)^2} \right) = \frac{2H}{H_{rms}^2} e^{-\left(\frac{H}{H_{rms}}\right)^2} \quad (2.42)$$

Para um registo de N ondas, o número de ondas com altura superior a uma dada altura é n , onde $P(H' \geq H) = \frac{n}{N}$.

Portanto, através da expressão (2.41) é possível determinar a altura H que é excedida por um número n de alturas num grupo de N ondas, tal que:

$$H = H_{rms} \sqrt{\ln \frac{N}{n}} \quad (2.43)$$

3 Movimentos do navio

A componente fundamental de qualquer modelo numérico para o estudo do comportamento de navios amarrados trata da resolução do problema da interacção de um corpo flutuante com as ondas. Cummins (1962) propôs uma abordagem para o estudo dessa interacção e que passa pela utilização das funções de resposta a impulso. Neste caso estas funções descrevem a evolução temporal da força generalizada actuante no navio segundo uma dada coordenada depois de um movimento impulsivo do navio segundo outra (ou a mesma) coordenada generalizada. Considerando pequenos a amplitude das ondas e os movimentos do navio, é possível assumir a linearidade do sistema corpo flutuante / ondas, sendo nesse caso a função de resposta a impulso determinada a partir dos resultados do problema de radiação obtidos no domínio da frequência.

Os modelos numéricos desenvolvidos para determinar os esforços e os movimentos de estruturas flutuantes destinadas à exploração petrolífera em mar alto podem ser utilizados para resolver aqueles problemas. O modelo numérico WAMIT, Newman e Sclavounos (1988), desenvolvido pelo Departamento de Engenharia Oceânica do Massachusetts Institute of Technology, é um desses modelos. Trata-se até do modelo mais utilizado devido ao desempenho dos algoritmos apresentados em Newman (1985) e que são utilizados no cálculo da função Green e suas derivadas.

3.1 Potencial do escoamento associado à resposta em frequência

As equações do movimento estabelecem o equilíbrio dinâmico entre as forças de inércia associadas à massa do navio e as forças externas (que resultam das interacções entre o casco e o fluído, designadas por forças hidrodinâmicas) que actuam no navio.

O navio é considerado um corpo rígido e que oscila em seis graus de liberdade. De acordo com a Figura 4, os movimentos oscilatórios consistem em três translações segundo cada um dos eixos de coordenadas (avanço - “surge”, abatimento - “sway”, arfagem - “heave”), e três rotações em torno dos mesmos eixos (balanço - “roll”, cabeceio - “pitch”, guinada - “yaw”).

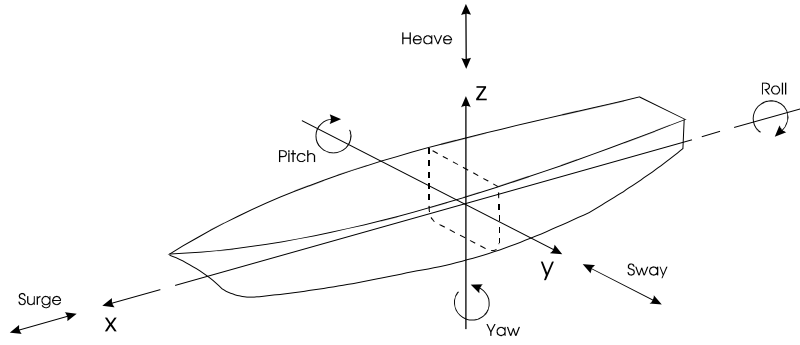


Figura 4 - Coordenadas generalizadas do movimento do navio.
Adaptado de Santos et al.(2010).

Apoiando-se na linearidade do sistema corpo flutuante / ondas, a interação de um corpo flutuante com as ondas pode resolver-se com base no princípio de sobreposição dos efeitos, decompondo em dois aquele problema: o problema da difracção e o problema de radiação, Figura 5.

No problema de difracção determinam-se as forças exercidas pelas ondas incidentes no navio imobilizado na sua posição média, enquanto no problema de radiação determinam-se as forças necessárias para deslocar o navio em águas de outra forma paradas.

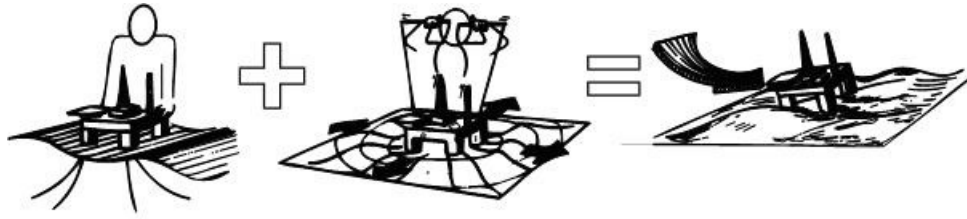


Figura 5 - Decomposição do problema da interacção de um corpo flutuante.
Adaptado de Faltinsen (1990).

A resposta estacionária do navio a ondas incidentes monocromáticas pode ser obtida através da solução das equações do movimento:

$$\sum_{j=1}^6 [(M_{kj} + a_{kj})\ddot{\xi}_j + b_{kj}\dot{\xi}_j + C_{kj}\xi_j] = F_k^E \quad k = 1, \dots, 6 \quad (3.1)$$

em que M_{kj} e C_{kj} são, respectivamente, as matrizes de massas e de restituição hidrostática do navio, a_{kj} e b_{kj} são os coeficientes de massa adicionada e de amortecimento, e F_k^E designa a força de excitação devido às ondas (associadas ao problema de difracção)

segundo a coordenada generalizada k para ondas monocromáticas de amplitude unitária e frequência ω cujo vector número de onda faz um ângulo β com o eixo longitudinal do navio. ξ_j representa a amplitude da oscilação segundo a coordenada generalizada j de um ponto seleccionado no navio, enquanto $\dot{\xi}_j$ e $\ddot{\xi}_j$ designam, respectivamente, a velocidade e a aceleração da mesma oscilação.

As soluções das equações diferenciais lineares de segunda ordem, equação (3.1), são movimentos do tipo harmónico:

$$\xi_j(t) = \text{Re}\{\xi_j^A(\omega) e^{i\omega t}\} = \xi_j^a \cos(\omega t + \theta_j) \quad (3.2)$$

onde ξ_j^A é a amplitude complexa do movimento oscilatório, ξ_j^a é a amplitude real do movimento e θ_j é a fase do movimento em relação à passagem da onda na posição do centro de gravidade do navio (i.e. o atraso da resposta no tempo). De acordo com a equação (3.2), a função de transferência de resposta do sistema é dada pela amplitude do movimento do navio, sendo:

$$H_j(\omega) = \xi_j^a(\omega) \quad (3.3)$$

Os movimentos, cujas amplitudes o modelo numérico WAMIT calcula, são os da origem do referencial baricêntrico do navio, Figura 4. De modo a obter-se a amplitude do movimento vertical de um ponto X' no navio cujas coordenadas em relação ao centro de gravidade do navio são (x', y', z') , é necessário avaliar a componente vertical do produto externo do vector velocidade de rotação pelo vector de posição desse ponto do navio em relação à origem do referencial baricêntrico do navio. Importa referir que as componentes do vector velocidade de rotação são grandezas complexas, para além de se conhecer o módulo da velocidade de rotação em torno de cada um dos eixos, convém também saber a fase da mesma velocidade. Portanto, é necessário realizar a seguinte operação:

$$\xi_3(X', t) = \text{Re}\{[\xi_3^A + y' \xi_4^A - x' \xi_5^A] e^{i\omega t}\} \quad (3.4)$$

O potencial do escoamento associado ao movimento do navio sob a acção das ondas, ϕ , pode decompor-se na soma de vários potenciais devido cada um deles a uma das seguintes causas, Tuck (1970):

- onda incidente, ϕ_0
- onda difractada pelo navio parado, ϕ_7

- ondas geradas pelo movimento do navio em águas de outro modo paradas, segundo cada uma das seis coordenadas generalizadas ϕ_1 a ϕ_6

$$\phi = \text{Re} \left[\sum_{j=0}^7 \phi_j \right] \quad (3.5)$$

Utilizando a factorização proposta por Tuck (1970), que corresponde a escrever cada um dos potenciais devidos ao movimento segundo a coordenada j em função da amplitude complexa da velocidade do mesmo movimento, a equação (3.5) escreve-se

$$\phi = \left[\varphi_0 + \varphi_7 + \sum_{j=1}^6 -i\omega\varphi_j \xi_j^A \right] e^{-i\omega x} \quad (3.6)$$

onde φ_j é um potencial complexo estacionário. Assim consegue separar-se o problema do escoamento do movimento do navio, sendo apenas necessário determinar os potenciais do escoamento para velocidades de amplitude unitária segundo cada uma das coordenadas generalizadas.

Atendendo à forma de cada um dos potenciais ϕ_j , as condições que eles satisfazem reflectem-se no potencial φ_j respectivo. Assim, da equação de continuidade, válida em todo o domínio fluido, tem-se:

$$\frac{\partial^2 \phi_j}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi_j}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi_j}{\partial z^2} = 0 \Rightarrow \frac{\partial^2 \varphi_j}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi_j}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi_j}{\partial z^2} = 0 \quad (3.7)$$

para a condição de superfície livre linearizada, tem-se, em $z = 0$:

$$\frac{\partial^2 \phi_j}{\partial t^2} + g \frac{\partial \phi_j}{\partial z} = 0 \Rightarrow \omega^2 \varphi_j - g \frac{\partial \varphi_j}{\partial z} = 0 \quad (3.8)$$

e para a condição de fronteira de fundo e outros limites sólidos fixos do domínio, tem-se:

$$\frac{\partial \phi_j}{\partial n} = 0 \Rightarrow \frac{\partial \varphi_j}{\partial n} = 0 \quad (3.9)$$

Além destas equações, os potenciais ϕ_j devem também verificar uma condição de fronteira na superfície molhada do corpo flutuante.

Para os potenciais ϕ_0 e ϕ_7 , relacionados com o problema de difracção, em cada ponto do casco do navio, a soma das componentes normais ao casco da velocidade do escoamento resultante de cada um dos potenciais deve ser nula, uma vez que o navio se encontra parado.

$$\frac{\partial \phi_0}{\partial n} + \frac{\partial \phi_7}{\partial n} = 0 \quad (3.10)$$

Para os potenciais ϕ_1 a ϕ_6 , relacionados ao problema de radiação, a componente normal ao casco do navio da velocidade do escoamento deve igualar a componente segundo a mesma normal da velocidade local do movimento do corpo.

$$\frac{\partial \phi_j}{\partial n} = \dot{\xi}_j n_j \quad (3.11)$$

onde $\dot{\xi}_j$ representa a componente segundo a coordenada generalizada j da velocidade do movimento e n_j a normal exterior generalizada à superfície molhada do navio, num ponto de coordenadas x_j .

Conhecido o potencial de velocidade, as pressões sobre o corpo flutuante podem ser determinadas a partir da equação de Bernoulli linearizada.

$$p = -\rho g z - \rho \frac{\partial \phi_j}{\partial t} \quad (3.12)$$

Considerando apenas a parcela dinâmica, já que a restante parcela está contabilizada no cálculo da matriz de restituição hidrostática, a força actuante segundo cada uma das coordenadas k vem dada por:

$$F_k = i\rho\omega \int_S (\phi_0 + \phi_7) n_k e^{-i\omega t} dS + \sum_{j=1}^6 -\rho\omega^2 \xi_j^A \int_S \phi_j n_k e^{-i\omega t} dS \quad (3.13)$$

A primeira parcela da soma anterior representa a força associada ao problema de difracção

$$F_k^D = i\rho\omega \int_S (\phi_0 + \phi_7) n_k e^{-i\omega t} dS \quad (3.14)$$

definindo a matriz de transferência, $T_{kj}(\omega)$, por:

$$T_{kj}(\omega) = -\rho\omega^2 \int_S \phi_j n_k dS \quad (3.15)$$

a força associada ao problema de radiação pode ser calculada por

$$F_k^R = \text{Re} \left[\sum_{j=1}^6 T_{kj} \xi_j^A e^{-i\omega t} \right] \quad (3.16)$$

Decompondo a matriz de transferência em parte real e imaginária da seguinte forma:

$$T_{kj}(\omega) = \omega^2 a_{kj}(\omega) + i\omega b_{kj}(\omega) \quad (3.17)$$

obtêm-se os chamados coeficientes de massa adicionada e de amortecimento, respectivamente a_{kj} e b_{kj} :

$$a_{kj} = -\rho \operatorname{Re} \left[\int_S \varphi_j n_k dS \right] \quad (3.18)$$

$$b_{kj} = -\rho \omega \operatorname{Im} \left[\int_S \varphi_j n_k dS \right] \quad (3.19)$$

O coeficiente de massa adicionada pode ser interpretado como a parcela da força em fase com a aceleração do movimento do corpo e que tem um carácter mais local, enquanto o coeficiente de amortecimento é a parcela da força em fase com a velocidade do corpo (isto é, está desfasada do movimento do corpo) e representa o amortecimento do movimento devido às ondas geradas pelo mesmo.

Nas expressões anteriores, S representa a superfície molhada do navio, n_k a componente segundo a coordenada generalizada k do vector normal à superfície molhada do casco e φ_j o potencial de radiação estacionário para as oscilações forçadas segundo a coordenada j .

3.2 Modelo numérico WAMIT

Para a resolução dos problemas de radiação e de difracção no domínio da frequência, é utilizado o modelo WAMIT. Este modelo resolve as equações integrais para os potenciais associados aos problemas acima mencionados quando o corpo flutuante está numa região não limitada horizontalmente.

A utilização do teorema de Green permite transformar em equações integrais as equações diferenciais que controlam os potenciais associados aos problemas de radiação e de difracção. Em vez de se ter um conjunto de equações válidas em todo o domínio, obtém-se um conjunto de equações a satisfazer as apenas nas fronteiras desse domínio, a região mais relevante para a determinação das forças induzidas pelo escoamento.

As equações integrais dos potenciais φ_j associados ao problema da radiação, são dadas por:

$$2\pi\varphi_j(x') + \int_S \varphi_j(x) \frac{\partial G(x', x)}{\partial n} dS = \int_S G(x', x) \frac{\partial \varphi_j(x)}{\partial n} \quad (3.20)$$

enquanto para o potencial de difracção φ_D , resultante da sobreposição dos potenciais da onda incidente, φ_0 , e da onda difractada pelo corpo, φ_S , se tem a seguinte equação integral:

$$2\pi\varphi_D(x') + \int_S \varphi_D(x) \frac{\partial G(x', x)}{\partial n} dS = 4\pi\varphi_0(x') \quad (3.21)$$

A função Green, $G(x', x)$, é o potencial de velocidade num ponto x devido a uma fonte de intensidade -4π colocada em x' e que satisfaz não só a condição de fronteira da superfície livre como a condição de radiação.

Aproximando a posição média da superfície molhada do corpo flutuante por um conjunto de painéis, triangulares ou quadrangulares, em cada um dos quais se assume um valor constante do potencial de velocidades, as equações integrais reduzem-se a um sistema de equações lineares para os valores do potencial de velocidade em cada um dos painéis. Para os potenciais de radiação vem:

$$2\pi\varphi_j(x_i) + \sum_{k=1}^N D_{ik} \varphi_j(x_k) = \sum_{k=1}^N S_{ik} \frac{\partial \varphi_j(x_k)}{\partial n} \quad (3.22)$$

em que $i=1, \dots, N$, sendo N o número de painéis. Para o potencial de difracção, o sistema de equações é dado por:

$$2\pi\varphi_D(x_i) + \sum_{k=1}^N D_{ik} \varphi_D(x_k) = 4\pi\varphi_0(x_i) \quad (3.23)$$

As matrizes D_{ik} e S_{ik} são definidas por:

$$D_{ik} = \int_{s_k} \frac{\partial G(x_i, \zeta)}{\partial n} d\zeta \quad (3.24)$$

$$S_{ik} = \int_{s_k} G(x_i, \zeta) d\zeta \quad (3.25)$$

em que s_k representa a superfície do painel k , n a normal a essa superfície e ζ uma variável de posição na mesma superfície. Os pontos onde as equações integrais são escritas, $G(x, \zeta)$, encontram-se localizados nos centros de gravidade de cada um dos painéis.

3.3 Exemplo de aplicação

Nesta secção, apresenta-se um exemplo de aplicação do modelo WAMIT para se estudar o comportamento do navio, em termos da amplitude dos movimentos segundo cada um dos seis graus de liberdade do mesmo. O navio escolhido é o “N/M Fernão Gomes”, com um comprimento de 114 m, uma boca de 19 m e um calado de 7 m.

Com o modelo WAMIT determinaram-se os coeficientes de massa adicionada e de amortecimento, bem como as forças de difracção do “N/M Fernão Gomes”, para um conjunto de 17 períodos entre 4 s e 20 s. A superfície molhada do casco do navio foi discretizada com 421 painéis, Figura 6, e investigou-se a influência da profundidade nos resultados.

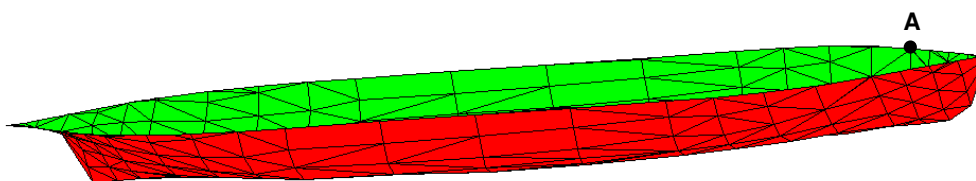


Figura 6 - Esquema da painelização da superfície molhada do casco do navio “N/M Fernão Gomes”.

Por forma a testar qualitativamente a influência da profundidade nos coeficientes de massa adicionada e de amortecimento determinaram-se aqueles coeficientes para o modo de arfagem, que é considerado o modo representativo do movimento vertical, do navio “N/M Fernão Gomes” a diferentes profundidades 37.90, 19.72, 17.93 e 8.89 m para o mesmo conjunto de períodos dos resultados anteriores.

A Figura 7, que apresenta aqueles coeficientes, mostra que não há variação significativa dos valores dos coeficientes de massa adicionada na gama de períodos considerada. No que diz respeito ao coeficiente de amortecimento, que está relacionado com a capacidade do navio para gerar ondas, a figura mostra que à medida que a profundidade diminui, aumenta a força que tem de ser feita para gerar ondas.

No que diz respeito à força de difracção segundo a arfagem, a Figura 8 ilustra a influência da profundidade nesta força quando o “N/M Fernão Gomes” se encontra sujeito a ondas cujo vector número de onda faz um ângulo de 45° com o eixo longitudinal do navio. A figura mostra um aumento dessa força à medida que a profundidade diminui, para períodos pequenos (inferiores a 8s), e uma diminuição para períodos grandes (superiores a 8s). Um resultado interessante nesse gráfico é a convergência dos valores da força,

independentemente da profundidade, para o valor correspondente à impulsão hidrostática à medida que o período da onda incidente aumenta.

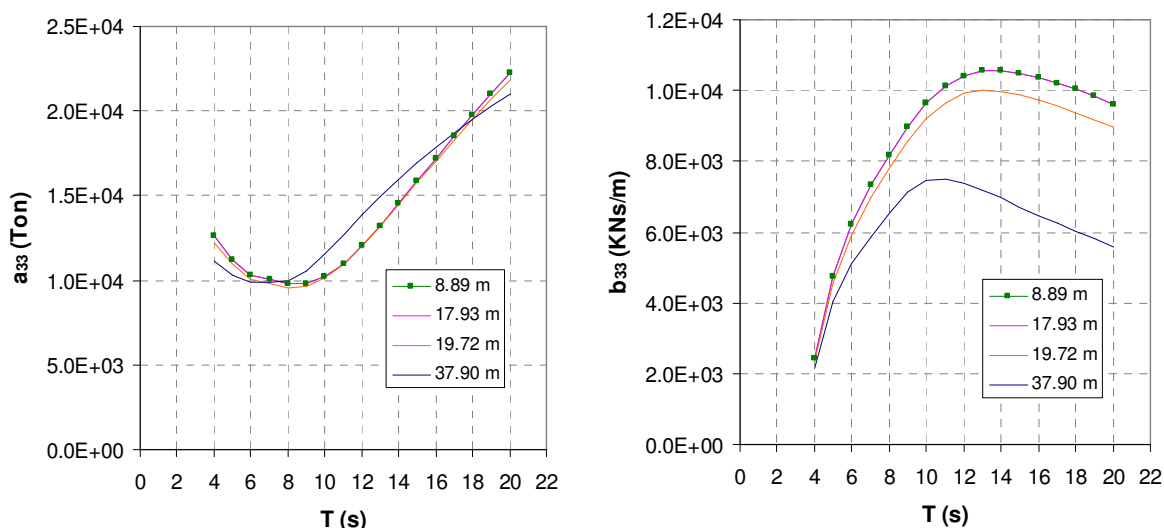


Figura 7 - Influência da profundidade nos coeficientes de massa adicionada e de amortecimento para o modo de arfagem do “N/M Fernão Gomes”.

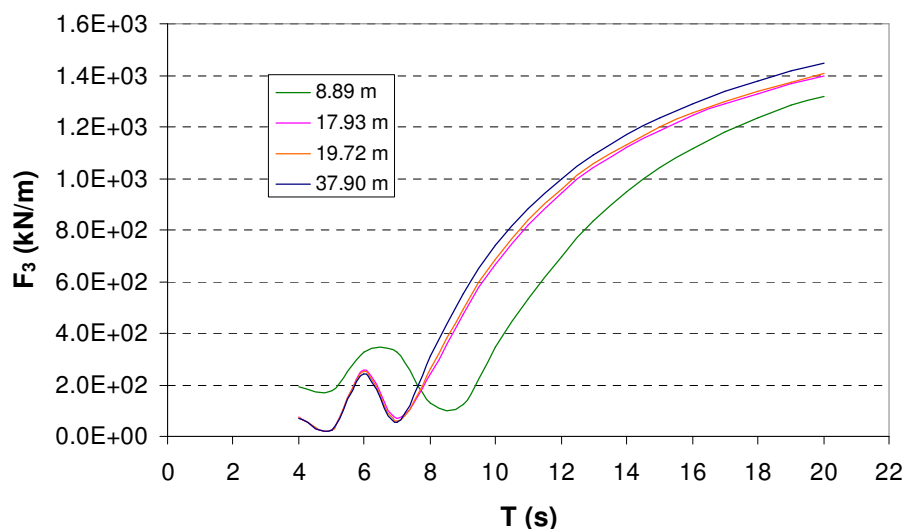


Figura 8 - Influência da profundidade na força vertical no “N/M Fernão Gomes” provocada por ondas incidentes cujo vector número de onda faz um ângulo de 45° com o eixo longitudinal do navio.

A Figura 9 apresenta os gráficos com as amplitudes dos movimentos verticais de um ponto no “N/M Fernão Gomes”, ponto A na Figura 6, cujas coordenadas são (45.5 m, 5.4 m, 0.0 m) em relação ao centro de gravidade do navio quando o navio está colocado numa região com 37.9 m de profundidade. Os gráficos estão agrupados por quadrante,

sendo evidente que ondas de través (ângulos de incidência em torno de 90° ou em torno de 270°) são aquelas para as quais a resposta é maior. Isto dever-se-á certamente ao pequeno valor do coeficiente de amortecimento para o movimento de balanço.

Para um ângulo de incidência de 30° , a Figura 10 ilustra a influência da profundidade na amplitude do movimento vertical do mesmo ponto no mesmo navio. A figura mostra que a diminuição da profundidade implica um aumento do período onde ocorre o máximo da resposta, verificando-se também um ligeiro aumento do valor desta amplitude máxima.

Importa referir que os valores apresentados nos gráficos são os correspondentes a uma onda incidente com 1 m de amplitude o que, para algumas situações, pode ser muito mais do que o expectável no local onde está o navio. Essa a razão porque para uma profundidade de 8.89 m a amplitude do movimento vertical é 1.65 m o que implicaria a colisão do navio com o fundo do mar.

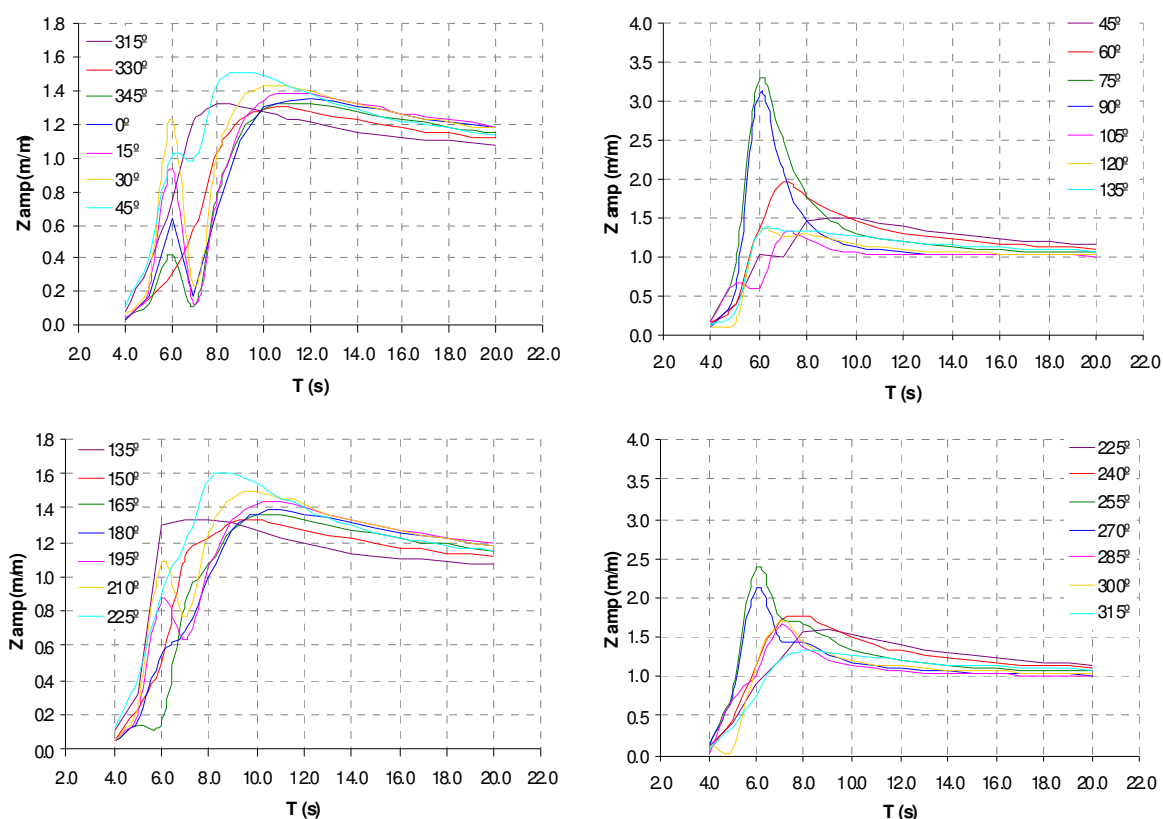


Figura 9 - Influência na amplitude do movimento vertical do ponto (45.5, 5.4, 0.0) do “N/M Fernão Gomes” do ângulo entre o eixo longitudinal do navio e o vector número de onda da onda incidente no navio quando ele está colocado sobre uma zona com 37.9 m de profundidade.

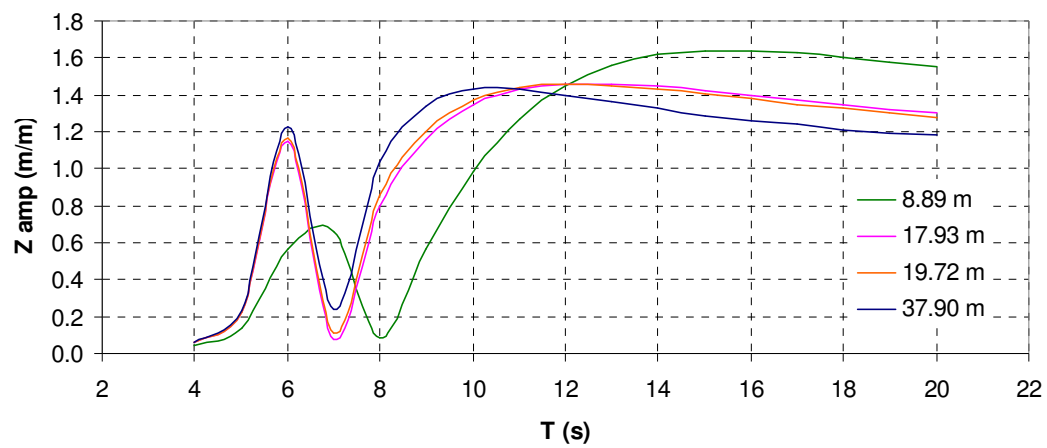


Figura 10 - Influência na amplitude do movimento vertical do ponto (45.5, 5.4, 0.0) do “N/M Fernão Gomes” da profundidade da zona onde o navio está para um ângulo de 30° entre o eixo longitudinal do navio e o vector número de onda da onda incidente no navio.

4 Aplicação ao porto da Praia da Vitória

Neste capítulo apresenta-se um exemplo de aplicação dos procedimentos descritos anteriormente na avaliação da inoperacionalidade devido aos movimentos verticais excessivos na viagem de entrada do navio “N/M Fernão Gomes” no porto da Praia da Vitória. Trata-se de uma análise directamente relacionada com a gestão das operações portuárias. Na avaliação da inoperacionalidade quantifica-se o número de vezes que determinada actividade não pode ser realizada por ser esperada a ocorrência de um dado fenómeno, o que tem interesse para as operações portuárias quotidianas, nas quais o objectivo é evitar problemas mais do que avaliar as consequências dos mesmos.

O porto de Praia da Vitória situa-se na costa Este da ilha Terceira no arquipélago dos Açores, Figura 11. Os dois molhes, Norte e Sul, que protegem o porto definem uma bacia portuária aproximadamente rectangular com cerca de 1 km x 2 km.



Figura 11 - Porto da Praia da Vitória.
Adaptado de Santos et al. (2010).

4.1 Regime da agitação marítima na entrada e no interior do porto

Na caracterização da agitação marítima ao largo do porto em estudo recorre-se a modelos de previsão de escala regional. Assim partindo de um campo de ventos (também fornecido por modelos numéricos, Tomé et al., 2005), o modelo WAVEWATCH III (WWIII, Tolman, 1999) prevê as características da agitação marítima na região do arquipélago (Simões et al., 2009).

Depois, transferem-se aquelas características para o interior do porto utilizando dois modelos numéricos acoplados para propagação de ondas: com o modelo SWAN (Booij et al., 1999) obtêm-se os valores na entrada do porto donde são transferidos para o interior do porto com o modelo DREAMS (Fortes, 2002). A razão para a utilização destes dois modelos numéricos é a inexistência de um único modelo capaz de simular, de forma computacionalmente eficaz, a propagação da agitação marítima nesta vasta região tendo em conta todos os fenómenos relevantes para aquela propagação.

Na Figura 12 apresenta-se um esquema da metodologia adoptada. Mais concretamente, para um dado estado de agitação marítima ao largo previsto pelo WWIII e caracterizado por $(H_s, T_z, DIR, DISP)$ em que H_s é a altura significativa do estado de agitação, T_z o período médio de zero ascendente, DIR a direcção média do período de pico e $DISP$ a dispersão direcciona para o mesmo período, o modelo SWAN transfere estas características para a zona em frente ao porto e daí o modelo DREAMS estima o valor de H_s , T_z e DIR no interior do porto em pontos pré-definidos da zona em estudo.

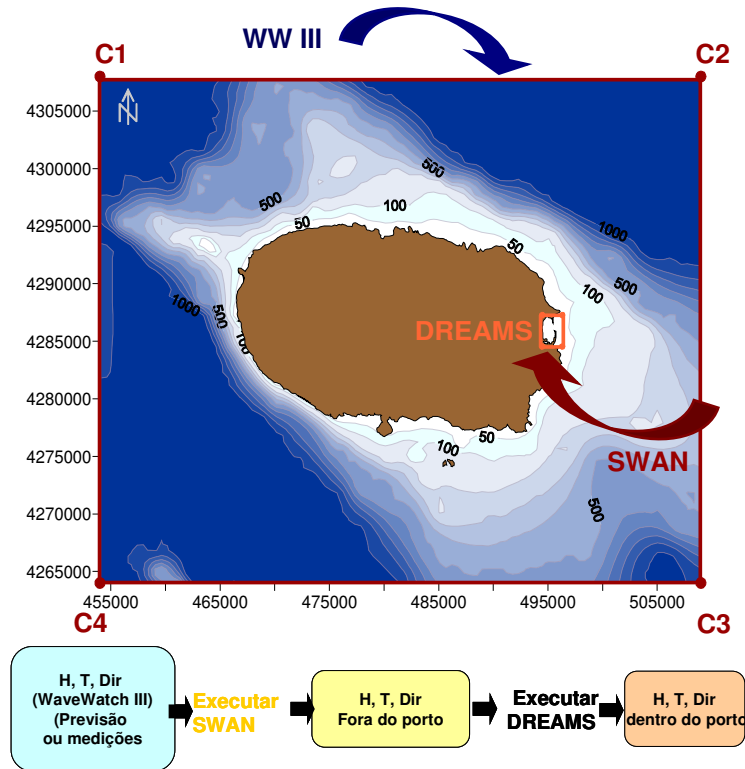


Figura 12 - Metodologia para a transferência do regime de agitação marítima do largo para o interior do porto.

4.1.1 Modelos numéricos

4.1.1.1 Modelo SWAN

O modelo SWAN (*Simulating WAVes Nearshore*, Booij et al., 1999) é um modelo numérico para geração, propagação e dissipação da agitação marítima. Este modelo baseia-se na equação da conservação da acção de onda e foi desenvolvido na Universidade Técnica de Delft. É um modelo espectral, isto é, para todas as direcções e frequências o modelo calcula a evolução das ondas originadas pelo vento, em regiões costeiras, em águas pouco profundas e na presença de correntes.

Este modelo simula a propagação da agitação marítima desde o largo até próximo da costa considerando os processos físicos de refacção, difracção e empolamento devido a variações do fundo e à presença de correntes, crescimento do estado de agitação por acção do vento, rebentação por influência do fundo e por excesso de declividade (*whitecapping*), dissipação de energia devido ao atrito de fundo, bloqueio e reflexão por correntes opostas e transmissão através de obstáculos.

Os dados necessários para a execução do SWAN são: a malha batimétrica da zona a modelar, as condições de agitação na fronteira de entrada do domínio de cálculo ou, alternativamente, o campo de ventos para o forçamento da geração de ondas e a indicação de quais os fenómenos físicos a ter em conta na geração e na propagação da agitação marítima. Pode ainda ser definido o campo de correntes.

O modelo SWAN apresenta como resultados, em qualquer ponto do domínio, a altura significativa da onda (H_s), o período médio (T_z) e de pico (T_p), a direcção média (θ_m) e de pico (θ) e a dispersão direcciona.

A correcta representação da propagação de estados de agitação neste modelo numérico tem algumas limitações. Uma das causas para essas limitações é a formulação teórica em que o modelo se baseia, nomeadamente a necessidade de calibração dos parâmetros envolvidos na descrição dos diferentes fenómenos físicos.

4.1.1.2 Modelo DREAMS

DREAMS (Fortes, 2002), é um modelo numérico para o cálculo da propagação e deformação de ondas regulares em zonas costeiras. O modelo pode ser aplicado para estudar as condições de agitação marítima dentro de um porto ou numa zona abrigada. É baseado na equação elíptica de declive suave, que descreve os efeitos combinados da refração e difracção de ondas monocromáticas propagando-se em fundos de inclinação suave característicos de portos, baías e zonas costeiras.

O modelo DREAMS utiliza uma malha de elementos finitos, com que foi discretizado o domínio em estudo e a fronteira desse domínio, e requer como dados de entrada as características da agitação incidente (período, direcção da onda e nível de maré). Os resultados do modelo DREAMS são os índices de agitação (H/H_o), relação entre a altura de onda no ponto do domínio de cálculo, H , e a altura de onda à entrada do domínio de cálculo, H_o , ou coeficientes de amplificação (em estudos de ressonância portuária), direcções de propagação da onda, e ainda o campo de velocidades horizontais na superfície livre e as linhas representativas das cristas das ondas (linhas de igual fase).

Como limitações do modelo salientam-se, (i) o facto do modelo não ter em conta os efeitos da dissipação de energia por rebentação e atrito de fundo, os efeitos das correntes na propagação das ondas ou os galgamentos sobre estruturas portuárias; (ii) O modelo é linear pelo que não tem em conta efeitos não-lineares, como por exemplo, a interacção de

ondas e correntes, a interacção de ondas devido à topografia do fundo, a transferência de energia entre componentes de onda e a geração de componentes de baixa frequência induzidas por grupos de ondas curtas; (iii) O modelo efectua a propagação de ondas regulares e unidireccionais, não tendo por isso em conta, os efeitos da dispersão em frequência e em direcção, presentes na agitação real; (iv) A aplicação do modelo está condicionada a fundos de declive suave, ou seja, até 1/3; (v) Na propagação de ondas marítimas de curto período, a aplicação do modelo está limitada a zonas relativamente pequenas, devido ao elevado esforço computacional exigido pelo modelo.

4.1.2 Matrizes de transferência

A metodologia adoptada é válida para a transferência de uma condição de agitação desde o largo até ao interior do porto. Contudo, face ao esforço computacional que pode estar associado à utilização dos modelos numéricos SWAN e DREAMS, parece difícil a sua replicação quando se trata de efectuar previsões em tempo real.

Por forma a contornar esta dificuldade, foi implementada uma metodologia, Santos et al. (2009), Palha (2007) que consiste na determinação a priori para a zona em estudo das matrizes de transferência da agitação marítima, i.e., os valores que relacionam a agitação marítima ao largo e a agitação num ou vários pontos.

Nesta metodologia, a simulação à priori de um vasto leque de condições de agitação marítima ao largo (H_s , T_z , DIR) permite representar apropriadamente todas as possibilidades de ocorrência dessa agitação ao largo. Com os resultados constrói-se uma matriz que permite interpolar eficazmente quaisquer outros casos não simulados. Este método para além de reduzir drasticamente o tempo de cálculo, permitindo simulações quase instantâneas, tem ainda a vantagem de tornar o processo de automatização muito mais simples (aplicação do módulo REGIMES do pacote SOPRO, Pinheiro *et al.*, 2006), consistindo este de apenas duas interpolações, uma relativa à propagação feita pelo SWAN e outra relativa à propagação feita pelo DREAMS.

4.1.3 Condições de aplicação dos modelos SWAN e DREAMS

Para aplicação do modelo SWAN, como se pode ver na Figura 13 e na Tabela 1, utilizaram-se 3 malhas de cálculo no processo de transferência do estado do mar ao largo

até junto do porto. Uma quarta malha adicional será utilizada para efectuar a transferência da ondulação da frente do porto para o interior do mesmo com o modelo DREAMS. A malha maior com um afastamento entre nós de 200 m define uma região rectangular com 55 km por 40 km que contém a região marítima envolvente da ilha Terceira. A segunda malha é quadrada com 20 km de lado e com um afastamento entre nós de 100 m. A terceira malha define uma região rectangular com 5 km por 8 km e um afastamento entre nós de 25 m. Utilizam-se também ficheiros de batimetria progressivamente mais refinados para cada malha de cálculo, todos obtidos da carta náutica, à escala 1:75 000, publicada pelo Instituto Hidrográfico com o nº 46405 e o título “Arquipélago dos Açores – Grupo Central, Ilha Terceira (planos dos portos de Angra do Heroísmo e da Praia da Vitória)”. Os eixos x e y das malhas de cálculo são paralelos aos lados dessa carta.

Tabela 1 - Características das malhas utilizadas na simulação com o SWAN.

Malha	X inicial	Y inicial	Nº. DX	Nº. DY	DX (m)	DY (m)
1	454000	4264000	275	220	200	200
2	484000	4278000	200	200	100	100
3	494000	4282000	200	320	25	25

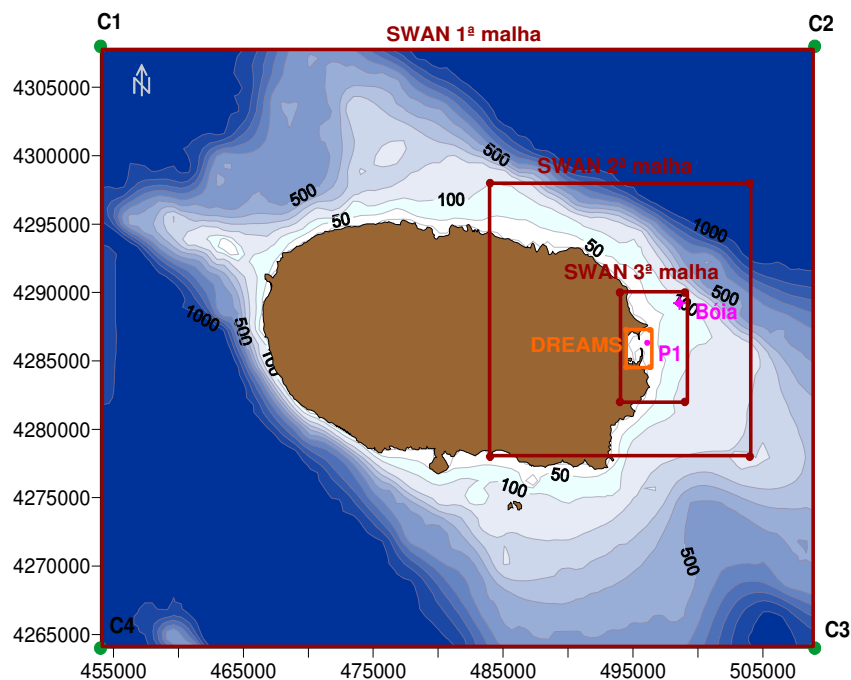


Figura 13 - Modelo SWAN, malhas computacionais.

A necessidade de utilização de mais que uma malha de cálculo com o modelo SWAN está relacionada com a expectativa de melhor desempenho do modelo numérico face à utilização de apenas uma no que se refere à qualidade da previsão. Quanto ao tempo necessário ao cálculo, uma simulação do SWAN com uma malha (a 1ª malha assinalada na Figura 13) demora cerca de 60s enquanto que com as três malhas de cálculo mencionadas acima uma simulação demora tipicamente 180 segundos. Com efeito, dois meses (Janeiro e Fevereiro de 2009) de simulações horárias equivalem a 1416 simulações e cerca de 23h, utilizando uma malha apenas. No caso de se usarem 3 malhas encaixadas demora aproximadamente 70h.

Para os cálculos do SWAN, o espectro direccional foi definido a partir da discretização de um espectro em frequência contendo 21 intervalos, de 0.070 a 2.0 Hz, com distribuição logarítmica, e de uma discretização de 2.5° em direcção cobrindo os 360°, dividida em 144 intervalos.

Todas as execuções foram realizadas com a versão 40.72 do SWAN e os fenómenos físicos incluídos foram:

- na 1ª malha global: refacção, o empolamento e a rebentação por influência do fundo e do excesso de declividade (whitecapping);
- nas 2ª e 3ª malhas: refacção, o empolamento e a rebentação por influência do fundo e do excesso de declividade (whitecapping), interacções entre tríades de ondas (triad wave-wave interactions) e a geração de harmónicas (frequency shifting).

Em nenhuma das execuções se considerou a influência das correntes marítimas.

As condições na fronteira da malha 1 provêm dos resultados do modelo WWIII. Inicialmente consideraram os quatro pontos localizados nos cantos da malha da Figura 13. Uma análise aos resultados da propagação das previsões em cada um destes quatro pontos permitiu verificar que o ponto com mais influência sobre a zona do Porto de Praia da Vitória é o ponto C2 (Figura 13). Assim, de modo a simplificar o processo de transferência entre os modelos WWIII e SWAN, consideraram-se os resultados obtidos por WWIII no ponto C2 sendo implementadas as condições de agitação previstas para este ponto em todos os pontos das fronteiras da 1ª malha do SWAN. As malhas subsequentes do SWAN têm como condições de fronteira os resultados da malha anterior.

O vento foi um dos parâmetros cuja influência foi investigada com mais cuidado. Foram simulados casos com e sem vento. Os resultados do modelo meteorológico regional

de mesoscala MM5 (Tomé et al., 2005; Esteves et al., 2007) foram introduzidos em todo o domínio computacional.

O domínio computacional, a batimetria e os pontos de previsão das características da agitação marítima no interior do porto utilizados no modelo DREAMS são apresentados na Figura 14.

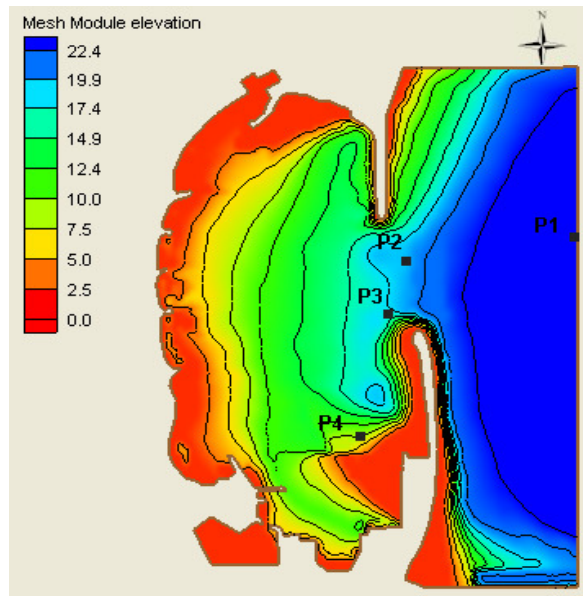


Figura 14 - Modelo DREAMS, batimetria com a localização dos pontos P1 a P4 na entrada e no interior do porto.

O domínio computacional foi discretizado por uma malha de elementos finitos com 300 139 elementos e 151 669 nós que foi gerada através do módulo de geração de malhas não-estruturadas GMALHA (Pinheiro et al., 2006).

No modelo DREAMS apenas se consideraram ondas provenientes dos quadrantes Norte-Este e Este-Sul. Estas condições de fronteira foram impostas na fronteira Este do domínio computacional, enquanto nas restantes fronteiras do domínio, correspondentes a diferentes trechos que delimitam o porto, procedeu-se ao cálculo dos respectivos coeficientes de reflexão.

A fronteira do modelo foi dividida em vários trechos, onde, do nó inicial ao nó final de cada trecho, foi atribuído um coeficiente de reflexão que caracteriza as propriedades reflectivas desse trecho. No total, a fronteira do modelo DREAMS foi dividida em 41 trechos.

O cálculo dos coeficientes de reflexão foi definido de acordo com o método de Seeling & Arens (1995), que entra em consideração com as características e configuração da linha de costa e também com as características da onda incidente (período e altura de onda). O coeficiente de reflexão foi calculado considerando um nível de maré médio de 1.40 m.

Uma vez conhecida a matriz de transferência da zona em estudo, para cada valor de agitação marítima ao largo (H , T e DIR) obtido num dado instante, procede-se à interpolação utilizando a matriz de transferência desse valor que fornece a previsão das características da agitação marítima nos pontos em estudo.

Na construção da matriz de transferência do modelo DREAMS foram analisados os resultados do modelo SWAN no ponto exterior ao domínio, ponto P1 da Figura 14. Daqui resultou serem os cálculos com o modelo DREAMS efectuados para períodos de onda (T) entre 4 a 20 s com 1 s de intervalo, e direcções das ondas (DIR) entre 0° 180° com 22.5° de intervalo, resultando num número total de combinações (T , DIR) de 153. Abrange-se assim todos os períodos e direcções da agitação marítima passíveis de penetrar no porto da Praia da Vitória. Note-se que tratando-se de um modelo linear, os cálculos são efectuados para um único valor de altura de onda igual a 1m.

4.1.4 Resultados numéricos

De modo a estudar a influência que o vento tem nos resultados do modelo SWAN sobre a região de propagação da onda estudada com o modelo numérico, compararam-se as alturas significativas dos estados de agitação medidos na bóia-ondógrafo colocada no exterior do porto, sobre uma profundidade de aproximadamente 90 m e a 4 km a Nordeste do porto (Figura 13), com os resultados do acoplamento dos modelos WWIII e SWAN.

Para tal, utilizaram-se previsões do vento aos 10 m, obtidas pelo CMMG – UAç (Tomé et al. 2005; Esteves et al. 2007) com o modelo meteorológico regional de mesoscala MM5 (PSU/NCAR). Os dados necessários para a inicialização do MM5 foram obtidos a partir do modelo global AVN. Tal como as previsões do estado do mar, as previsões meteorológicas são feitas a 72 horas e actualizadas todas as 12 horas.

Na Figura 15 estão representadas as séries temporais das alturas significativas previstas na zona da bóia-ondógrafo com o modelo WWIII e com o modelo SWAN, para

as simulações com vento e sem vento, bem como as respectivas medições na bóia nos meses de Janeiro e Fevereiro de 2009. Também se encontra representada a série temporal para o caso de duas malhas encaixadas com vento.

De acordo com a Figura 15 pode concluir-se que os resultados da altura significativa obtidos pelo modelo SWAN são muito semelhantes aos valores observados na bóia-ondógrafo de Praia da Vitória. As simulações realizadas com o vento são as que conduziram a resultados próximos das medições, no entanto, mesmo para essas simulações, há situações em que os resultados dos modelos numéricos foram inferiores aos observados, como é o caso dos dias 19 e 20 de Janeiro. Para a simulação sem vento os valores são sempre inferiores às medições. Não existem diferenças muito significativas entre as previsões com apenas 1 malha ou com 2 malhas encaixadas. Tal deve-se certamente à localização do ponto longe da proximidade da costa.

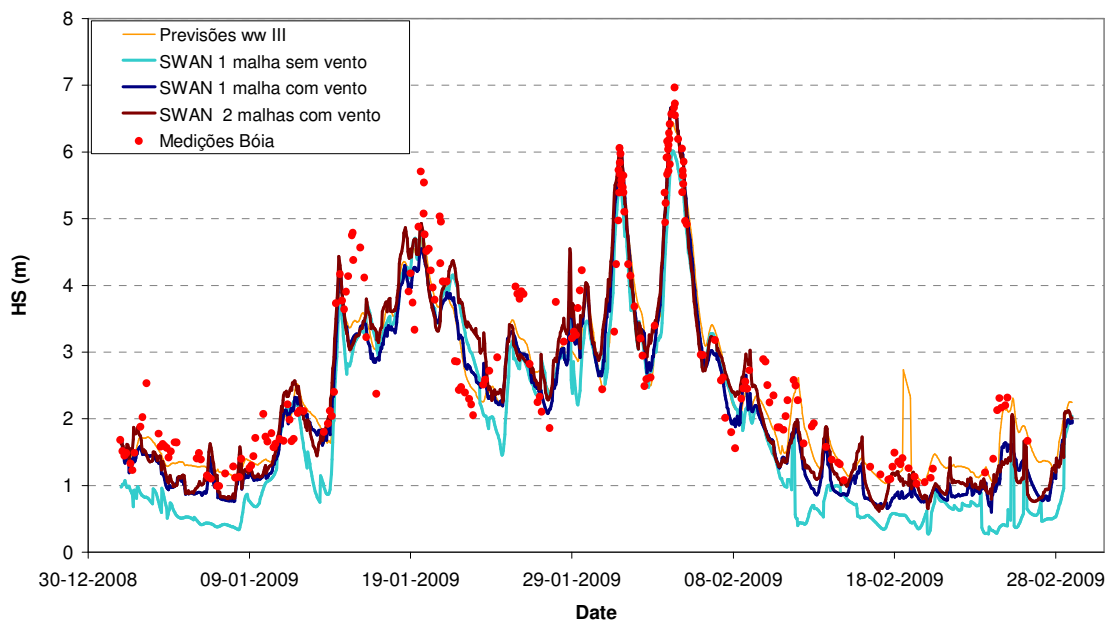


Figura 15 - Comparação dos resultados da altura significativa obtidos com o SWAN e com as medições da bóia.

A influência do vento nos resultados numéricos do modelo SWAN é evidente. Assim, a transferência das previsões à escala global para pontos nas proximidades da entrada do porto com o modelo SWAN deve incluir sempre o efeito do vento. Os resultados obtidos são transferidos para o modelo DREAMS de forma a simular a propagação da agitação marítima para o interior do porto.

Para cada um dos três pontos (P2, P3 e P4), Figura 14, localizados na entrada e no interior do porto foram definidas as matrizes de transferência correspondentes.

Portanto, utilizando duas matrizes de transferência (uma associada ao modelo SWAN e outra associada ao modelo DREAMS), foram transferidos os 1461 registos de agitação marítima obtidos com base nos dados de previsão fornecidos pelo modelo WWIII, correspondentes a dois meses de dados de previsão calculados para um período de 1 de Janeiro a 28 de Fevereiro de 2009, para os pontos na entrada e no interior do porto, permitindo a caracterização da agitação marítima em cada um desses pontos. A Figura 16 apresenta as correspondentes séries temporais da altura significativa e da direcção da onda.

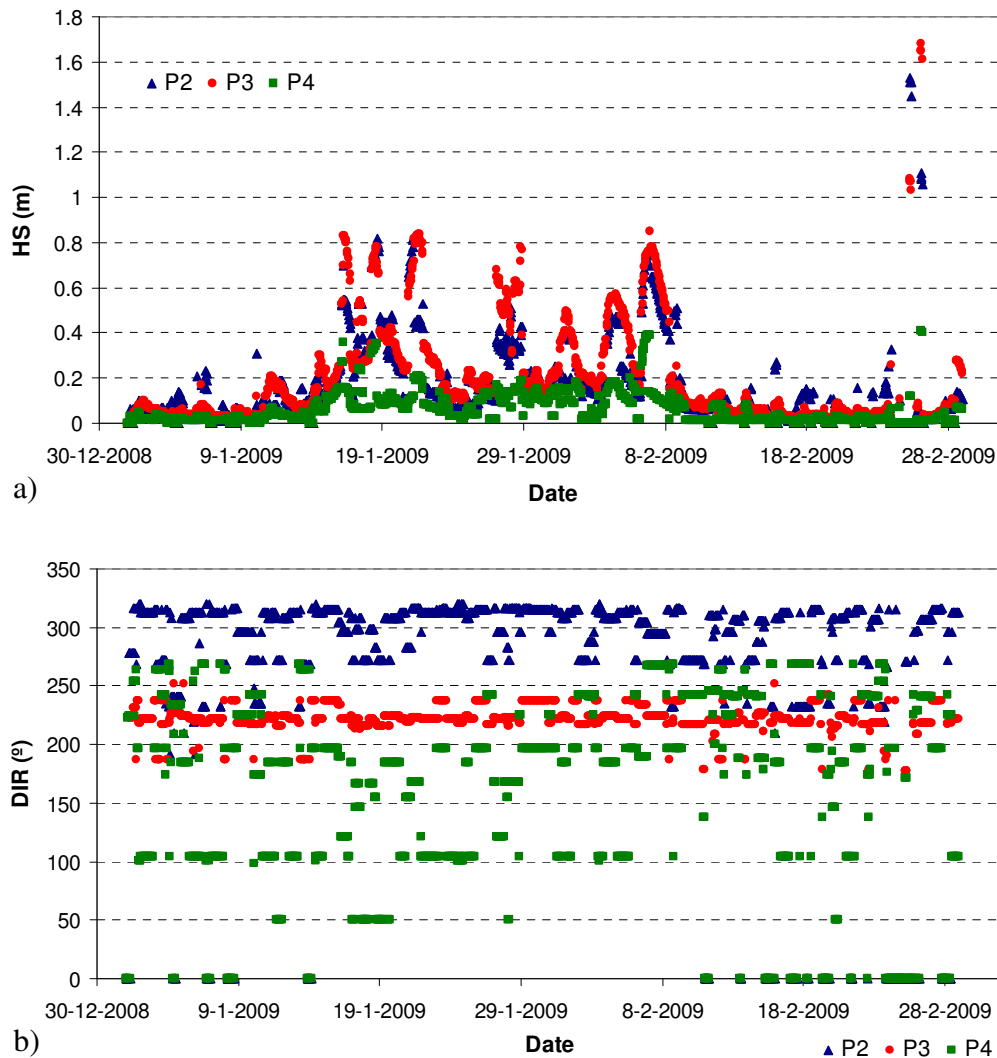


Figura 16 - Série temporal dos valores da a) altura significativa (H_s) e b) direcção média (DIR) para os pontos localizados no interior do porto, para um período de 1 de Janeiro a 28 de Fevereiro de 2009.

Em termos de altura significativa o ponto P4 encontra-se mais protegido da agitação incidente do que os restantes pontos, nunca excedendo o valor de 0.4 m. Quanto aos pontos P2 e P3, que se encontram localizados na entrada do porto, eles são submetidos à maioria das ondas incidentes. Como se pode observar, os valores de altura significativa apresentam um máximo no dia 26 de Fevereiro nos pontos P2 e P3 de 1.5 m e 1.7 m, respectivamente. Em relação às direcções da onda, os resultados mostram uma diminuição desde a entrada no porto até ao ponto localizado no interior do porto. Como seria de esperar, na entrada do porto (ponto P2) não há grande variação da direcção da onda face à direcção da onda incidente. No entanto, no ponto P4 existe uma clara variação da direcção das ondas incidentes, em consequência da localização do mesmo.

A Tabela 2 apresenta os valores dos parâmetros estatísticos (máximo, média, mínimo, desvio padrão e gama mais frequente) para as características da agitação marítima, quer no ponto, ao largo, de previsão com o modelo WWIII, quer em cada um dos pontos seleccionados (P1 a P4).

Tabela 2 - Parâmetros estatísticos da agitação marítima ao largo e nos pontos P1 a P4.

Pontos \ Parâmetros estatísticos		Máximo	Média	Mínimo	Desvio padrão	Gama mais frequente
Offshore	Hs (m)	2.44	0.88	0.11	0.59	[0.0 - 1.0] (61.09%)
	Tp(s)	16.69	8.70	2.21	4.68	[12.0 - 13.0] (18.50%)
	DIR (°)	172.50	49.01	7.50	57.09	[20.0 - 30.0] (56.92%)
SWAN P1	Hs(m)	2.46	0.89	0.11	0.59	[0.0 - 1.0] (60.12%)
	Tp (s)	16.69	10.87	2.71	3.11	[12.0 - 13.0] (26.55%)
	DIR (°)	172.50	49.50	7.50	57.01	[20.0 - 30.0] (57.49%)
DREAMS P2	Hs (m)	1.53	0.16	0.00	0.19	[1.0-2.0] (99.44%)
	Tp (s)	16.69	10.56	0.00	3.92	[12.0-13.0] (26.55%)
	DIR (°)	320.35	268.47	0.00	90.54	[310 - 320] (40.04%)
DREAMS P3	Hs (m)	1.68	0.19	0.00	0.22	[0.0-1.0] (99.44%)
	Tp (s)	16.69	10.55	0.00	3.93	[12.0-13.0] (26.55%)
	DIR (°)	251.21	201.06	0.00	66.59	[220- 230] (40.32%)
DREAMS P4	Hs (m)	0.41	0.06	0.00	0.07	[0.0-1.0] (100%)
	Tp (s)	16.69	10.56	0.00	3.92	[12.0-13.0] (26.55%)
	DIR (°)	268.15	163.02	0.00	78.06	[100 - 110] (20.34%)

Os resultados mostram uma modificação clara das características da agitação marítima desde o ponto P1, próximo da entrada do porto, até ao ponto P4.

Com efeito, no que se refere à altura significativa, há um máximo de 2.46 m no ponto P1 (valor médio 0.89 m) enquanto no ponto mais interior do porto (ponto P4) a altura

significativa máxima fica por 0.41 m (valor médio 0.06 m). Do exposto, pode concluir-se que à medida que as ondas se propagam para o interior do porto, o valor de H_s diminui.

No que diz respeito às direcções da agitação marítima, os resultados mostram uma clara rotação desde a entrada do porto até ao interior do mesmo. Como esperado, na entrada do porto (ponto P1) não se observa alteração significativa na direcção da agitação marítima em relação à medida no ponto, ao largo, de previsão com o modelo WWIII.

4.2 Resposta do “N/M Fernão Gomes” à agitação incidente

Ao longo da trajectória de entrada do navio no porto de Praia da Vitória, a faixa que pode ser ocupada pelo navio é dividida num conjunto de troços por forma a se observar, nos centróides de cada um desses troços, os movimentos verticais de um ponto do navio. No caso do “N/M Fernão Gomes” escolheu-se um ponto cujas coordenadas no referencial do navio são (45.5, 5.4, 0.0), ponto A da Figura 6. Os centróides de cada um dos troços correspondem aos pontos P1 a P4 da Figura 14 e nesses pontos são determinadas as características das ondas incidentes. Nesta abordagem não se teve em conta a velocidade de avanço do navio.

Na Tabela 3 encontra-se definida a profundidade e o rumo do navio nos pontos que definem a trajectória de entrada no porto. Como existe uma variação da profundidade é necessário calcular quatro funções de resposta em frequência, uma para cada um dos centróides em que foi dividido o percurso.

As funções de resposta do navio são assim determinadas em termos da altura de oscilação vertical de um ponto seleccionado no navio, para diversos valores dos períodos da onda incidente no navio e para os valores do ângulo entre o eixo longitudinal do navio e a direcção de propagação da onda.

Tabela 3 - Profundidades e rumos do navio nos centróides de cada um dos troços em que foi dividido o percurso de entrada no porto.

	P1	P2	P3	P4
Profundidade (m)	37.90	19.72	17.93	8.89
Rumo navio (°)	270	255	225	180

4.2.1 Espectro da resposta do navio

Determinada a função resposta dos movimentos do navio nos pontos que definem a trajectória do navio, pode-se analisar as respostas do navio para qualquer estado de agitação regular ou irregular.

De acordo com a equação (2.32), é possível determinar o espectro da resposta, $S_R(\omega)$, a partir do espectro da agitação incidente no navio, $S(\omega)$, e da função de resposta (em termos da amplitude da oscilação num ponto no navio) nos pontos que definem a trajectória do navio, P1 a P4.

O espectro da agitação incidente, $S(\omega)$, é determinado com base no espectro empírico de JONSWAP (função de H_s e T_p), equação (2.29).

Na Figura 17 que ilustra o espectro da agitação incidente e o espectro da resposta à agitação incidente no navio, para uma onda proveniente do quadrante Norte – Este, (direcção de 30°), com altura significativa de 0.4 m e um período de pico de 12 s. Verifica-se que os valores do espectro da resposta são superiores aos valores do espectro da agitação, na gama das frequências mais baixas. Para esta condição de agitação marítima, o espectro da agitação incidente tem um valor máximo de $0.37 \text{ m}^2\text{s}$ para a frequência de 0.1 rad/s nos pontos P1 a P4, enquanto o espectro da resposta ainda que tenha um valor máximo para a mesma frequência nos pontos P1 a P4, apresenta um valor máximo de $0.80 \text{ m}^2\text{s}$ no ponto P2.

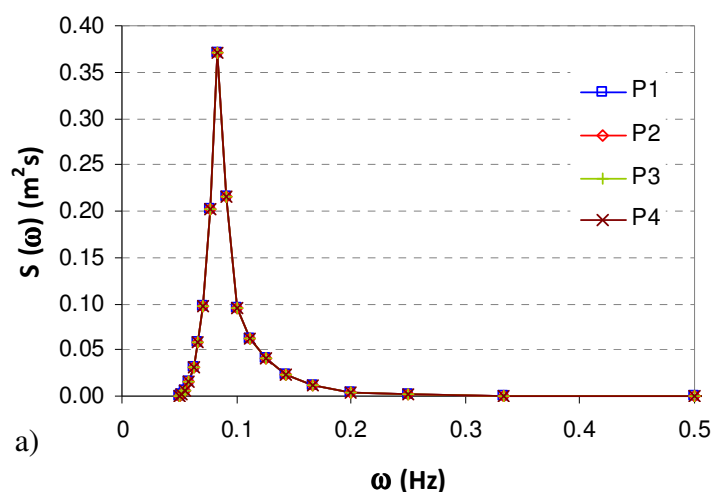


Figura 17 - a) Espectro da agitação incidente, $S(\omega)$; b) Espectro da resposta à agitação incidente no navio, $S_R(\omega)$. Para $H_s=0.4 \text{ m}$, $T_p=12 \text{ s}$ e $Dir=30^\circ$.

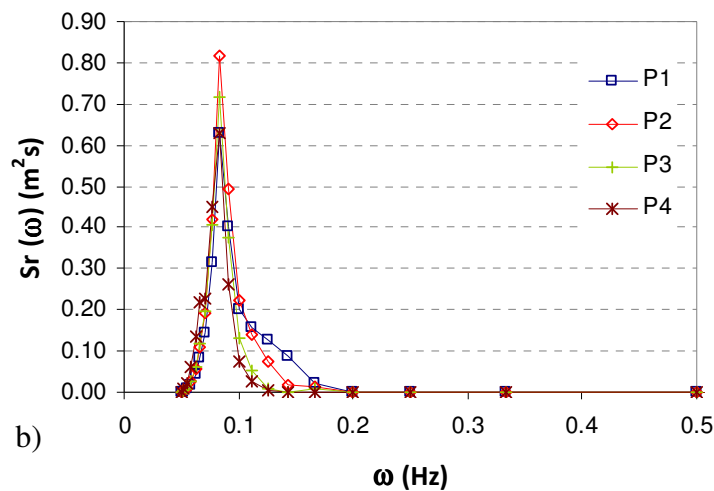


Figura 17 - (cont.)

4.2.2 Avaliação dos efeitos da agitação marítima no navio em manobra

Conhecidas as características da agitação marítima na posição do navio, bem como as funções de resposta do navio em termos da amplitude dos seus movimentos quando se encontra em manobra na trajectória de entrada no porto. É possível avaliar os efeitos da agitação marítima num navio em manobra em cada um dos troços em que se divide a área do porto varrida pelo navio na sua trajectória de entrada no porto.

Atendendo ao uso pretendido para essa informação assim se podem definir abordagens diferentes para a verificação da ultrapassagem de limiares estabelecidos para esse movimento. Tais limiares devem ser definidos de acordo com a actividade portuária de interesse para o utilizador do sistema MOIA.

O sistema MOIA, apresenta-se ao utilizador como uma interface gráfica composta por vários módulos: (i) caracterização da agitação marítima no interior do porto a partir das previsões obtidas ao largo com modelos regionais; (ii) caracterização dos efeitos da agitação marítima nas infra-estruturas, na navegação e nas operações portuárias; (iii) emissão de mensagens de aviso para as diversas áreas portuárias; (iv) base de dados para armazenamento da informação relevante.

4.2.2.1 Resposta em frequência

Sendo a altura do movimento vertical um parâmetro relevante para a gestão das actividades portuárias, pode utilizar-se a função de resposta em frequência para estimar esta quantidade a partir das características da agitação incidente no navio.

Contudo, tal abordagem implica que o utilizador que pretenda introduzir um limiar para o movimento do navio tenha que:

- indicar ao sistema MOIA que o objecto das suas preocupações tem uma função de resposta em frequência;
- introduzir as tabelas que definem essa função de resposta em frequência;
- definir o limiar da resposta que despoleta a emissão de uma mensagem de aviso.

A função de resposta do navio que relaciona as características da agitação incidente com a amplitude do movimento vertical tem que ser definida como uma matriz multidimensional cujas entradas são valores discretos dos parâmetros da agitação marítima e a saída é a amplitude ou altura do movimento vertical do navio correspondente a esses parâmetros.

Enquanto os intervalos entre aqueles valores discretos dos parâmetros da agitação marítima forem tais que seja válida a interpolação da saída da matriz e os parâmetros da agitação incidente no navio estiverem contidos nas gamas para as quais a matriz foi inicialmente definida, esta abordagem tem a vantagem de estimar muito bem a resposta do navio.

As Tabelas 4 e 5 apresentam uma secção da matriz multidimensional que define a função de resposta do navio relacionando a altura do movimento vertical de um ponto de coordenadas (45.5, 5.4, 0.0) no referencial do “N/M Fernão Gomes”, com as características da ondulação – Tabela 4 e da agitação – Tabela 5 incidentes. O navio encontra-se a navegar numa região com profundidade é de 37.90 m dirigindo-se para Oeste com ondas vindas de Nordeste (45°).

Na Tabela 5, os valores referem-se à altura significativa da série temporal do movimento do navio sujeito a um estado de agitação irregular caracterizado por um espectro JONSWAP com a altura significativa e período de pico indicados na tabela. Estes valores foram determinados a partir do momento de ordem zero do espectro da resposta do movimento de um ponto do navio, $S_R(\omega)$, como indicado na equação (2.38).

De acordo com os resultados das Tabelas 4 e 5, os valores da função de resposta da amplitude do movimento do navio para uma caracterização da agitação incidente irregular, que dizem respeito à média do terço das ondas mais altas, não diferem muito dos valores obtidos para uma agitação incidente regular, do “N/M Fernão Gomes” navegando numa zona de profundidade de 37.9 m com um rumo de 270° e com ondas incidentes de 45°. Portanto, em termos dos valores para os quais a altura do movimento vertical excede um valor limiar, estes vão ter um comportamento muito semelhante.

Tabela 4 - Matriz multidimensional da função de resposta com a altura do movimento vertical para ondas incidentes regulares. “N/M Fernão Gomes” numa zona com 37.9 m de profundidade, dirigindo-se para Oeste com ondas de Nordeste.

		Período da onda (s)													
		4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Altura da onda (m)	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.5	0.06	0.20	0.50	0.50	0.72	0.75	0.74	0.72	0.69	0.67	0.64	0.63	0.61	0.60
	1	0.12	0.40	1.01	1.00	1.44	1.51	1.49	1.43	1.38	1.33	1.29	1.25	1.23	1.20
	1.5	0.18	0.60	1.51	1.49	2.16	2.26	2.23	2.15	2.07	2.00	1.93	1.88	1.84	1.80
	2	0.24	0.81	2.02	1.99	2.87	3.02	2.97	2.87	2.76	2.66	2.58	2.51	2.45	2.40
	2.5	0.30	1.01	2.52	2.49	3.59	3.77	3.71	3.59	3.45	3.33	3.22	3.14	3.06	3.00

Tabela 5 - Matriz multidimensional da função de resposta com a altura significativa do movimento vertical para agitação incidente irregular. “N/M Fernão Gomes” numa zona com 37.9 m de profundidade, dirigindo-se para Oeste com ondas de Nordeste.

		Período de pico (s)													
		4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Altura significativa (m)	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.5	0.09	0.23	0.43	0.49	0.61	0.67	0.68	0.68	0.68	0.67	0.66	0.64	0.63	0.61
	1	0.17	0.47	0.86	0.99	1.23	1.33	1.36	1.37	1.35	1.34	1.31	1.29	1.25	1.22
	1.5	0.26	0.70	1.29	1.48	1.84	2.00	2.05	2.05	2.03	2.00	1.97	1.93	1.88	1.83
	2	0.35	0.94	1.71	1.98	2.45	2.66	2.73	2.73	2.71	2.67	2.62	2.57	2.51	2.44
	2.5	0.44	1.17	2.14	2.47	3.07	3.33	3.41	3.42	3.39	3.34	3.28	3.21	3.14	3.05

4.2.2.2 Matriz de possibilidade

Contudo, na maioria dos casos, o utilizador está apenas interessado no resultado da experiência de Bernoulli (Moran, 1984) definida por exceder (ou não) um limiar pré-definido para o movimento do navio. Nesse caso, em vez de se considerar a altura do movimento vertical do navio como a saída da matriz multidimensional utilizada para definir a função de resposta do navio, é mais interessante exprimir o resultado na forma de um número binário (1 – se o limiar foi excedido e 0 – se o limiar não foi excedido). As

Tabelas 6 e 7 apresentam uma secção desta nova matriz, que pode designar-se como “matriz de possibilidade”, para os mesmos parâmetros de entrada das Tabela 4 e 5, respectivamente, mas utilizando 0.5 m como o limiar para a altura do movimento vertical do ponto (altura significativa, no caso de se ter um estado de agitação incidente no navio).

Tabela 6 - Matriz multidimensional da ondulação incidente para a qual a altura do movimento vertical excede um limiar de 0.5 m. “N/M Fernão Gomes” numa zona com 37.9 m de profundidade, dirigindo-se para Oeste com ondas de Nordeste.

		Período da onda (s)													
		4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Altura da onda (m)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0.5	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	1.5	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	2	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	2.5	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Tabela 7 - Matriz multidimensional da agitação incidente irregular para a qual a altura significativa do movimento vertical excede um limiar de 0.5 m. “N/M Fernão Gomes” numa zona com 37.9 m de profundidade, dirigindo-se para Oeste com ondas de Nordeste.

		Período de pico (s)													
		4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Altura significativa (m)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0.5	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	1.5	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	2	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	2.5	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Esta abordagem da “matriz de possibilidade” tem a vantagem de ser mais compacta pois o valor do limiar está contido na definição da matriz. Além disso, pode ser utilizada em outras actividades portuárias de modo uniforme. Por exemplo, se o utilizador estiver interessado na recepção de mensagens de aviso quando existe a possibilidade de galgamento de um determinado troço do contorno da bacia portuária exceder um limiar pré-fixado. Isto implica apenas o varrimento da gama de parâmetros da agitação marítima esperados nessa zona e a “marcação” dos conjuntos de parâmetros para os quais aquele limiar é excedido.

Uma das maiores desvantagens da mesma abordagem é a necessidade de definir uma nova matriz sempre que se pretende considerar um valor diferente para o limiar do mesmo

fenómeno. Outro problema é a inutilidade da interpolação nos resultados de tais matrizes uma vez que um resultado entre zero e um é insignificante para a emissão de uma mensagem de aviso. Com efeito, porque apenas existem duas respostas para a experiência de Bernoulli para um conjunto discreto de combinações de parâmetros da agitação marítima incidente, quando surge uma combinação desses parâmetros que não está incluída naquele conjunto, é impossível saber o resultado da experiência de Bernoulli correspondente.

Soluções possíveis incluem a utilização do resultado do ponto mais próximo naquele conjunto ou utilizar o resultado arredondado simetricamente da média dos valores correspondentes aos pontos envolventes do ponto não testado.

4.2.2.3 Inoperacionalidade devido a movimentos excessivos

Por último procede-se à análise da inoperacionalidade do acesso ao porto da Praia da Vitória devido a movimentos verticais excessivos do navio sujeito à agitação marítima.

As gamas de parâmetros da agitação marítima a considerar na definição das “matrizes de possibilidade” para cada ponto de interesse foram definidas com base nos valores transferidos a partir das previsões ao largo, isto é, do regime de agitação em cada ponto, Tabela 2.

Embora a selecção do espaçamento dos parâmetros a utilizar na definição das “matrizes de possibilidade” devesse ter em conta a forma da função de resposta, no exercício que se apresenta avalia-se a influência daquele espaçamento no número de vezes que é excedido o limiar para os movimentos verticais. Assim testaram-se três valores distintos do espaçamento de cada parâmetro (direcção da onda incidente: 15°, 10° e 5°; período da onda incidente: 2 s, 1 s e 0.5 s; altura da onda incidente: 1.00 m, 0.50 m e 0.25 m), o que totaliza 27 combinações de espaçamentos de parâmetros.

Os resultados obtidos e apresentados na Tabela 8 e na Tabela 9, mostram que o procedimento da média dos valores nos pontos vizinhos produz piores resultados do que o procedimento do ponto mais próximo.

Tabela 8 - Espaçamento de parâmetros que levou à menor diferença entre os resultados do procedimento do ponto mais próximo e a função de resposta do navio. Para um limiar de 0.5 m no movimento vertical do ponto (45.5, 5.4, 0.0) do “N/M Fernão Gomes” na trajectória de entrada no porto.

	Função de resposta do navio	Melhor espaçamento			Valor do ponto mais próximo
		ângulo	período	altura	
P1	880	10	2.0	1.00	884
P2	536	15	0.5	0.25	560
P3	583	15	2.0	0.25	588
P4	180	15	1.0	0.25	221

Tabela 9 - Espaçamento de parâmetros que levou à menor diferença entre os resultados do procedimento da média dos pontos vizinhos e a função de resposta do navio. Para um limiar de 0.5 m no movimento vertical do ponto (45.5, 5.4, 0.0) do “N/M Fernão Gomes” na trajectória de entrada no porto.

	Função de resposta do navio	Melhor espaçamento			Média dos pontos vizinhos
		ângulo	período	altura	
P1	880	5	0.5	0.25	907
P2	536	15	2.0	0.25	962
P3	583	15	2.0	0.25	829
P4	180	15	2.0	0.25	390

Não é evidente que seja a discretização mais fina (isto é, o menor espaçamento de parâmetros) a que conduza a uma melhor estimativa do número de excedências.

A análise das diferenças entre os valores obtidos com a função de resposta do navio e os obtidos com a matriz de possibilidade mostra ser a altura da onda o parâmetro para o qual o menor espaçamento é relevante. Isto é especialmente importante quando logo para o primeiro valor não nulo da altura de onda o limiar escolhido é excedido. Isto implica que para um conjunto extenso de valores de altura de onda baixos se obtenham estimativas erradas do resultado da experiência de Bernoulli. Estas estimativas erradas são mais prováveis no procedimento da média dos valores em pontos vizinhos.

5 Conclusões

Este trabalho teve como objectivo o desenvolvimento de uma metodologia para determinar a resposta dos movimentos verticais de um navio livre à agitação marítima incidente ao longo da sua trajectória de entrada num porto. Tal metodologia permite avaliar a possibilidade desse estado de agitação induzir movimentos excessivos do navio em manobra, bem como avaliar a inoperacionalidade da faixa de navegação associada a movimentos verticais cuja altura seja ultrapassada por um limiar pré-definido.

A metodologia foi testada com a avaliação da inoperacionalidade associada aos movimentos excessivos do “N/M Fernão Gomes” na sua manobra de entrada no porto da Praia da Vitória.

Para determinar a resposta do navio livre em termos da amplitude dos movimentos verticais de um ponto seleccionado no navio, utilizou-se o modelo WAMIT. Este modelo permite determinar os potenciais associados aos problemas de radiação e de difracção do navio livre, especialmente quando o navio está colocado em zonas de profundidade muito limitada, como é o esperado na entrada de bacias portuárias.

Os movimentos, cujas amplitudes o modelo numérico WAMIT calcula, são os da origem do referencial baricêntrico do navio. Assim, para se obter a amplitude do movimento vertical em qualquer ponto do navio, é necessário avaliar a componente vertical do produto externo do vector velocidade de rotação pelo vector de posição desse ponto do navio em relação à origem do referencial baricêntrico do navio.

Para caracterizar a agitação marítima na entrada e no interior do porto, recorreu-se a dados de previsão para a caracterização da agitação marítima ao largo do porto, fornecidos pelo modelo WWIII e à transferência destas características para o interior do porto utilizando dois modelos numéricos acoplados para a geração e a propagação de ondas, o modelo SWAN e DREAMS.

Analizou-se a influência do vento nos resultados do modelo SWAN, comparando os valores da altura significativa observados na bóia-ondógrafo da Praia da Vitória com os resultados do modelo SWAN para as simulações com e sem vento. As simulações que incluíram o vento foram as que conduziram a resultados próximos das medições observadas na bóia-ondógrafo. Desta forma, pode-se concluir a necessidade de considerar o vento nas simulações para a Praia da Vitória.

Como a interacção do navio com as ondas nele incidente é considerada linear, a resposta do navio a um estado de agitação pode ser determinada utilizando as ferramentas matemáticas de análise deste tipo de sistemas.

Assim, na determinação da amplitude do movimento vertical em qualquer ponto seleccionado no casco do navio utilizaram-se resultados do domínio da frequência.

A densidade espectral de energia é uma forma de representar o sinal de excitação a actuar no navio, tendo-se considerado para a agitação marítima o espectro empírico JONSWAP.

A partir do espectro da agitação incidente no navio e da função de resposta em frequência (em termos da amplitude da oscilação de um ponto seleccionado no navio) é possível determinar o espectro da resposta do navio à agitação incidente.

Uma vez conhecidas as características da agitação marítima na posição do navio, bem como as funções de resposta do navio em termos da amplitude dos seus movimentos quando se encontra em manobra na trajectória de entrada no porto, avaliou-se os efeitos da agitação marítima no “N/M Fernão Gomes” em cada um dos troços em que se divide a área do porto varrida pelo navio na sua trajectória de entrada no porto.

Atendendo ao uso pretendido para essa informação foram apresentadas duas abordagens para a definição dos limiares que levam à emissão de mensagens de aviso numa ferramenta de gestão portuária.

Uma das abordagens utilizada foi baseada na avaliação directa da altura do movimento do navio. A outra abordagem baseou-se na primeira para definir a chamada “matriz de possibilidade” cujas entradas são os parâmetros da agitação marítimas no ponto de interesse e o resultado é zero, quando o limiar pré-estabelecido para a altura do movimento vertical não é ultrapassado, ou um, caso contrário.

Para a entrada do navio “N/M Fernão Gomes” no porto da Praia da Vitória, foi avaliada a inoperacionalidade do navio nos pontos que definem a trajectória de entrada no porto associada aos movimentos verticais cuja a altura excede um limiar de 0.5m, para uma agitação incidente regular e irregular. Os resultados mostram que a função de resposta definida como a altura significativa do movimento vertical do navio para uma agitação incidente irregular (que dizem respeito à média do terço das ondas mais altas) não diferem muito dos resultados da função de resposta definida como a altura do movimento vertical do navio para uma agitação incidente regular.

No que se refere à inoperacionalidade associada às alturas dos movimentos verticais de um ponto do navio que excedem o limiar de 0.5 m, verificou-se que é possível obter resultados com a “matriz de possibilidade” semelhantes aos da matriz de transferência. Tal ocorre quando se utiliza o procedimento do ponto mais próximo com a “matriz de possibilidade”.

Num trabalho futuro pretende-se incluir nestas ferramentas a velocidade de avanço do navio.

6 Referências

- Azevedo, E.B., Mendes, P., Gonçalo, V., 2008. Projectos CLIMAAT e CLIMARCOST Clima e Meteorologia dos Arquipélagos Atlânticos, Clima Marítimo e Costeiro. Workshop Intenacional sobre Clima e Recursos Naturais nos Países de Língua Portuguesa -WSCRA08.
- Booij, N., Ris, R.C., Holthuijsen, L.H., 1999. A third-generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation, *J. Geographical Research*, C4, 104, 7649-7666.
- Booij, N., Ris, R.C., Holthuijsen, L.H., 1996. The SWAN wave model for shallow water. *Proc. 25th Int. Conf. Coastal Eng.*, Orlando, 1, 668-676.
- Chakrabarti, S.K., 1987. *Hydrodynamics of Offshore Structures*, WIT Press, Southampton, UK.
- Cummins, W.E., 1962. Impulse response function and ship motions, *Schiffstechnik*, Vol. 9, pp.101-109.
- Dean, R. G., Dalrymple, R. A. *Water wave mechanics for engineers and scientists*. World Scientific, 1984. v. 2 of *Advanced Series on Ocean Engineering*.
- Esteves, M., Tomé, R., Miranda, P.M.A., Azevedo, B., 2007. Desempenho do MM5 em modo operacional: O Furacão Gordon na região dos Açores. 5^o Simpósio de Meteorologia e Geofísica da APMG, Peniche, Portugal.
- Faltinsen, O.M., 1990. *Sea loads on ships and offshore structures*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Fortes, C.J.E.M., 2002. Transformações não-lineares de ondas marítimas em zonas portuárias. Análise pelo método dos Elementos Finitos. Tese de doutoramento, IST/DEM.
- Fortes, C.J.E.M., 1993. Modelação matemática da refacção e difracção combinadas de ondas marítimas (análise pelo método dos elementos finitos). Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, perfil de Energia. IST.
- Goda, Y., 1985. *Random Seas and Design of Maritime Structures*. Advanced series on ocean engineering, v.15. World Scientific Publishing, Singapore.
- Hasselmann K.T.P., Barnett, E., Bouws, H., Carlson, D.E., Cartwright, K., Enke, J.A., Ewing, H., Gienapp, D.E., Hasselmann, P., Kruseman, A., Meerburg, P., Miller, D.J., Olbers, K., Richter, W., Sell, H. Walden, 1973. Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP)' *Ergänzungsheft zur Deutschen Hydrographischen Zeitschrift Reihe, A(8) (Nr. 12)*, pp.95.
- Longuet-Higgins, M.S., 1952. On the Statistical Distribution of the Wave Heights of Sea Waves, *Journal of Marine Research*, Vol. 11, pp. 245-266.
- Moran, P.A.P, 1984. *An introduction to probability theory*. Oxford University Press, New York.
- Newland, D.E., 1975. *An Introduction to Random vibrations and spectral analysis*. Longman group limited, London.

- Newman, J. N., Sclavounos, P. D., 1988. The computation of wave loads on large offshore structures. In Boss 88 Conference, Norway, pp. 1-19.
- Newman, J.N., 1985. Algorithms for the free-surface Green function, *Journal of Engineering Mathematics*, Vol. 19, pp.7-67.
- Palha, A.C., 2007. pyMOIA – Previsão, em Tempo Real, da Agitação Marítima em Zonas Portuárias. 5^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária, Lisboa.
- Pierson, W. J., Moskowitz, L., 1964. A proposed spectral form for fully developed windseas based on the similarity form of Kitaigorodskii. *Journal of Geophysical Research*, Washinton, v. 69, p. 5181–5190.
- Pinheiro, L.V., Fernandes, J.L.M., Fortes, C.J.E.M., 2006. Sobre um gerador de malhas de elementos finitos com densidade local condicionada à batimetria para modelos de propagação de ondas em zonas portuárias. I Conferência Nacional de Métodos Numéricos em Mecânica dos Fluidos e Termodinâmica, Lisboa.
- Rusu, L., 2009. Wave modelling and ship response in coastal waters with currents. Tese de doutoramento, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Santos J.A, Rodrigues S., Pinheiro L., Fortes C.J.E.M., Simões A., Azevedo E.B., 2010. Influência do vento local na transferência da agitação marítima para o porto da Praia da Vitória. 10^o Congresso da água, APRH, Alvor.
- Santos, J.A., Guilherme, L., Fortes, C.J.E.M., Pinheiro, L., Simões A., 2009. Coupling numerical models for wave propagation in the MOIA package. *Journal of Coastal Research*, SI 56 (Proc. 10th International Coastal Symposium), pp.544–548.
- Seeling, W.N., Arens, J.P., 1995. Wave reflection and energy dissipation by coastal structures, in *Wave forces on inclined and vertical wall structures*, editado por N. Koboyashi, ASCE, pp. 28-55.
- Simões, A., Tomé, R., Reis, F., Azevedo, E., 2009. Avaliação da Qualidade das Previsões de Agitação Marítima no Arquipélago dos Açores. Projectos CLIMAAT e CLIMAAT II, INTERREG IIIB – Açores, Madeira e Canárias, MAC/2.3/A3 – 03/MAC/2.3/A5.
- Tolman, H.L., 1999. User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 1.18. NOAA / NWS / NCEP / OMB technical note 166, 110 pp.
- Tomé, R., Ramalho, C., Ferreira, J.P., Miranda, P.M.A., 2005. Previsão do tempo nos Açores com Modelos de Alta Resolução. 4^o Simpósio de Meteorologia e Geofísica da APMG, Sesimbra, Portugal.
- Tuck, E. O., 1970. Ship motions in shallow water. *Journal of Ship Research*, Vol. 14, pp.317-328.
- Vincent, C., Demirbilek, Z., 2006. Coastal Engineer Manual (EM 1110-2-1100), chapter1:Water Wave Mechanics. U.S. Army Corps of Engineers- USACE.